

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPOSTA DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO PARA A CO-  
DIGESTÃO DOS LODOS GERADOS NA ETE BRASÍLIA  
NORTE E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**CLARICE CARVALHO SILVA**

**ORIENTADORA: ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM**

**CO-ORIENTADOR: FRANCISCO JAVIER CONTRERAS PINEDA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF, 02 DE DEZEMBRO DE 2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPOSTA DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO PARA A CO-  
DIGESTÃO DOS LODOS GERADOS NA ETE BRASÍLIA NORTE E  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**CLARICE CARVALHO SILVA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

**APROVADA POR:**

---

**ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM, Doutorado em Engenharia Hidráulica e  
Saneamento (EESC/USP – São Carlos)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**YOVANKA PÉREZ GINORIS, Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e  
Bioquímicos (UFRJ)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**LENORA LUDOLF GOMES, Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e  
Recursos Hídricos (UFMG)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 02 de DEZEMBRO de 2016.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, CLARICE CARVALHO

Proposta de Biodigestor Anaeróbico para a Co-digestão dos Lodos Gerados na ETE Brasília Norte e Resíduos Sólidos Urbanos. [Distrito Federal] 2016.

xii, 79 p. (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Biogás

2. Biodigestores

3. Co-digestão Anaeróbia

4. Recuperação de Energia

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, C.C. (2016). Proposta de Biodigestor Anaeróbico para a Co-digestão dos Lodos Gerados na ETE Brasília Norte e Resíduos Sólidos Urbanos. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Clarice Carvalho Silva

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Proposta de Biodigestor Anaeróbico para a Co-digestão dos Lodos gerados na ETE Brasília Norte e Resíduos Sólidos Urbanos.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Clarice Carvalho Silva

Condomínio Ville de Montagne - Quadra 20, Casa 29 - Jardim Botânico

71680-357 - Brasília/DF - Brasil

“Há coisas que acontecem na vida e há coisas que você faz acontecer. É a diferença entre ter um plano e não ter”.

À procura da felicidade

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que iluminou o meu caminho e a minha vida nessa jornada difícil. Seu fôlego de vida em mim foi o que me deu sustento e coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

Agradeço aos meus pais, por acreditarem no meu potencial, por toda a confiança que depositaram em mim, e por toda a paciência que tiveram nos momentos de estresse. Mãe, o seu cuidado e dedicação foram essenciais para que eu conseguisse superar as dificuldades, e em alguns momentos, me deram a esperança para seguir em frente e realizar meus sonhos. Pai, seu apoio significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

À minha orientadora, Ariuska Karla Barbosa Amorim, pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e amizade.

Ao professor co-orientador Francisco Javier Contreras Pineda, que me auxiliou desde o princípio, sempre me dando conselhos sábios e me ajudando em alguns momentos difíceis. Nossas conversas durante e além dos grupos de estudos foram fundamentais.

Às queridas amigas e companheiras de profissão: Ana Paula, Dandara, Eliza, Marina, Tamara e Thainy, pelo convívio, pelas noites mal dormidas e apoio constante. Sem vocês, nada teria sido o mesmo.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

## RESUMO

O crescimento da geração de resíduos sólidos urbanos e sua disposição é um dos maiores problemas ambientais nos últimos anos, devido, principalmente, à falta de gerenciamento adequado e tratamento destes resíduos. Nesse sentido, a digestão anaeróbia é uma tecnologia promissora, que admite, além do tratamento apropriado dos resíduos sólidos, o seu aproveitamento energético.

Dentro deste contexto, o presente trabalho buscou propor, de forma pioneira, a implantação de um conjunto de biodigestores anaeróbios em escala real na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte, com o propósito de tratar uma mistura entre os lodos gerados no processo de tratamento de esgoto e a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos gerados nas proximidades da ETE.

Assim, o projeto apresentou um pré-dimensionamento de três biodigestores anaeróbios, de formato cilíndrico, fundo cônico e cobertura semiesférica, com volume total de aproximadamente 4.300 m<sup>3</sup> cada, operando na faixa mesofílica de temperatura.

Para nortear os objetivos deste trabalho, foi realizado o levantamento de dados sobre as características dos lodos produzidos na ETE Brasília Norte bem como a quantificação da geração e composição química dos resíduos sólidos urbanos, e a caracterização da mistura entre os dois co-substratos. A mistura se mostrou adequada em relação às concentrações de sólidos totais, mas apresentou baixa relação C/N, e altas quantidades de oxigênio. Fatores estes que podem ser prejudiciais ao metabolismo das arqueas metanogênicas, que são o principal grupo microbiano responsável pela produção de gás metano dentro dos sistemas de digestão anaeróbia.

Palavras-chave: digestor anaeróbio, co-digestão, lodos, FORSU, biogás.

## **ABSTRACT**

The increasing urban solid waste generation and disposal has been presenting itself as one of the most concerning environmental issues in the last years. Mostly due to the lack of proper management and treatment. Anaerobic biodigestion is a promising technique, which allows, besides the treatment of the waste, the recovery of the energy present in the resulting biogas.

Therefore, the present work has been engaged on a proposition of the use of anaerobic digesters in real scale next to the sewage treatment plant located in the north of Brasília with the purpose to harness the mixed sludge generated through the wwt process and along with organic solid wastes from the surrounding neighborhoods.

In summary, the project present the pre-calculations of three anaerobic digesters with cylindrical shape, conic bottom and a semispherical cover, each one with a volume of about 4,300 m<sup>3</sup>, operating in the mesophilic range of temperature.

For the purposes of this work, the characteristics of generation and composition of the sludge and the solid wastes were collected, then the combination among them was reviewed. The mixture proved itself to be adequate in terms of total solids, but it lodged a low C/N ratio and high oxygen amounts, which could be harmful to the methanogenic archaea, which are the main group of microorganisms responsible for methane production in anaerobic systems.

**Keywords:** anaerobic digestion, sewage sludge, solid waste, biogas.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	OBJETIVO GERAL .....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1	FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	5
3.2	FATORES INTERVENIENTES NO PROCESSO ANAERÓBIO .....	7
3.3	LODOS PRODUZIDOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS QUE UTILIZAM O SISTEMA DE LODOS ATIVADOS .....	11
3.3.1	Tratamento do lodo.....	15
3.3.2	Modelos de biodigestores anaeróbios.....	18
3.4	CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO GERADO EM ETE E FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	23
3.5	ESTUDO DE CASO: RSU DO DISTRITO FEDERAL E LODOS GERADOS NA ETEB NORTE .....	28
3.5.1	Regiões atendidas pela Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte ...	31
3.5.2	Lodos produzidos na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte .....	32
4	METODOLOGIA .....	37
4.1	ESTRUTURA GERAL DO TRABALHO .....	37
4.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS .....	38
4.2.1	Massa e vazão de FORSU adicionada ao digestor .....	38



4.2.2	Concentração de Sólidos .....	39
4.2.3	Tempo de retenção e sólidos .....	39
4.2.4	Fatores de carga .....	39
4.2.5	Estimativa de degradação de sólidos voláteis.....	40
4.2.6	Estimativa da produção de metano e biogás.....	40
4.2.7	Dimensões dos digestores.....	40
4.2.8	Cálculo dos misturadores .....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS LODOS GERADOS NA ETEB NORTE .....	43
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA FORSU GERADA NAS REGIÕES PRÓXIMAS À ETEB NORTE .....	45
5.2.1	Interpolação dos dados de FORSU nas regiões analisadas .....	48
5.3	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS DIGESTORES ANAERÓBIOS .....	52
5.3.1	Massa, vazão e concentração de sólidos na mistura de Lodos e FORSU afluentes ao digestor.....	53
5.3.2	Tempo de retenção de sólidos, estimativas de degradação de sólidos voláteis e fatores de carga.....	54
5.3.3	Estimativa da produção de metano e biogás.....	55
5.3.4	Dimensões dos digestores.....	56
5.3.5	Cálculo dos misturadores .....	59
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	61

APÊNDICES .....	71
-----------------	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química dos lodos primário, secundário e misto não tratados e do lodo digerido anaerobicamente (Metcalf & Eddy, 2016). .....	14
Tabela 3.2. Dados típicos para as características físicas, quantidades de lodos produzidos e concentração de sólidos em diferentes operações e processos utilizados em estações de tratamento de efluentes (Metcalf & Eddy, 2016 - Adaptado) .....	16
Tabela 3.3. Dados de alguns sistemas investigados e disponíveis na literatura científica. .	24
Tabela 3.4. Quantidade média per capita de RSU para os anos de 2014 e 2015 (SLU, 2016 - Adaptado) .....	29
Tabela 3.5. Representatividade dos materiais na coleta convencional por Região Administrativa do Distrito Federal (SLU, 2016 - Adaptado). .....	32
Tabela 4.1. Dimensões dos misturadores do tipo turbina Rushton com 6 pás (Condori Bustamante, 2013). .....	41
Tabela 5.1. Parâmetros e Indicadores de geração de lodo na ETEB Norte (afluente ao desaguamento), dados médios para o ano de 2014 (Batista, 2015). .....	43
Tabela 5.2. Carga de sólidos aplicada aos digestores atualmente em operação da ETEB Norte no ano de 2014 (Batista, 2015). .....	43
Tabela 5.3. Parâmetros operacionais de controle do processo de digestão anaeróbia da ETEB Norte (Batista, 2015) .....	44
Tabela 5.4. Composição dos lodos de esgotos gerados na ETEB Norte quanto aos parâmetros agronômicos, expressos em base seca – Caracterização inicial do lodo CAESB (Batista, 2015). .....	44
Tabela 5.5. Frações de proteínas, lipídeos e carboidratos de alguns tipos de substratos que compõem a FORSU, em % (Belitz <i>et al.</i> , 2009; Carucci <i>et al.</i> , 2005; Christ <i>et al.</i> , 2000; Pedrosa <i>et al.</i> , 2015; Straka <i>et al.</i> , 2007). .....	45

Tabela 5.6. Composição química simplificada dos diferentes tipos de biomassa em % (Straka et al., 2007).	46
Tabela 5.7. Composição elementar da FORSU nas cidades de Ceilândia e Taguatinga – DF (Gadelha, 2005)	47
Tabela 5.8. População estimada por Região Administrativa (Codeplan, 2014 – Brasília/Plano Piloto; Codeplan, 2016 – demais RAs)	47
Tabela 5.9. Dados de produção teórica diária de FORSU por Região Administrativa do Distrito Federal atendida pela ETE Norte	48
Tabela 5.10. Estimativas das massas de substratos e elementos químicos da FORSU das RAs analisadas, por componente.	49
Tabela 5.11. Valores médios de ST, STV, Umidade e Densidade da FORSU do Distrito Federal (Gadelha, 2005).	51
Tabela 5.12. Dados de entrada de lodos, FORSU e parâmetros utilizados para o cálculo das dimensões dos digestores anaeróbios mediante a mistura dos co-substratos.	53
Tabela 5.13. Valores de taxas de aplicação sugeridos pela literatura (Metcalf & Eddy, 2016).	54
Tabela 5.14. Dimensões calculadas para os digestores anaeróbios	57
Tabela 5.15. Dimensões calculadas para os misturadores do tipo turbina Rushton	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia com redução de sulfato (CHERNICHARO, 2007). ....	6
Figura 3.2. Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional (von Sperling, 1997).....	11
Figura 3.3. Composição típica do esgoto doméstico (Melo e Marques, 2000).....	12
Figura 3.4. Distribuição da energia química no tratamento de efluentes com lodos ativados e digestão anaeróbia de lodos (Metcalf & Eddy, 2016) .....	17
Figura 3.5. Tipos de digestores anaeróbios (Apples <i>et al.</i> , 2008 - Adaptado) .....	19
Figura 3.6. Modelos de biodigestores mais utilizados no Brasil (CETESB, 2006). ....	20
Figura 3.7. Tipos de misturadores mecânicos comumente utilizados em tanques agitados. (a) Turbina de pás abertas; (b) Turbina de disco; (c) Turbina vertical de pás curvas. (McCabe, 1985 - Adaptado).....	22
Figura 3.8. Dispositivos de transferência de calor em tanque agitados (Lopes, 2013). ....	22
Figura 3.9. Divisão do Distrito Federal segundo as Regiões administrativas (TRE, 2016).28	
Figura 3.10. Percentuais das frações de resíduos sólidos nas Regiões Administrativas selecionadas considerando a divisão reciclável, rejeito e orgânico – Coleta Seletiva (SLU, 2016).....	30
Figura 3.11. Percentuais das frações de resíduos sólidos nas Regiões Administrativas selecionadas considerando a divisão reciclável, rejeito e orgânico – Coleta Convencional (SLU, 2016).....	30
Figura 3.12. Vista aérea da Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte (© GoogleEarth, 2016). ....	31
Figura 3.13. Unidades e etapas de tratamento na ETEB Norte (Nakazato, 2005 - Adaptado). ....	33

Figura 3.14. Fluxograma da ETE Brasília Norte – Tratamento da fase sólida Adaptado de (Nakazato, (2005) e Batista, 2015).....	34
Figura 4.1. Estrutura geral do trabalho .....	37
Figura 4.2. Misturador do tipo turbina Rushton (a) fotografia do impelidor e em (b) indicação das dimensões (Condori Bustamante, 2013). .....	41
Figura 5.1. Teores de proteínas, lipídios, carboidratos e outros substratos avaliados para a FORSU das RAs analisadas. ....	50
Figura 5.2. Massa de elemento químico por tipo de resíduo alimentar.....	51
Figura 5.3. Porcentagem de elemento químico na FORSU analisada.....	51
Figura 5.4. Dimensões de um tanque de digestão padrão (Condori Bustamante, 2013 - Adaptado). ....	52
Figura 5.5. Conde fundo adotado com indicação do ângulo $\alpha_1$ (Arfelli, 2009 - Adaptado). ....	56
Figura 5.6. Tampo semiesférico (Eurobase, 2008 - Adaptado).....	57
Figura 5.7. Dimensões dos digestores anaeróbios de alta taxa e estágio simples obtidas a partir do pré-dimensionamento.....	58
Figura 5.8. Detalhes da turbina Rushton adotada.....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CH<sub>4</sub> – Gás metano

CO<sub>2</sub> – Gás Carbônico

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

ETEB Norte - Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte

FORSU – Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos

H<sub>2</sub> – Hidrogênio

H<sub>2</sub>O – Água

H<sub>2</sub>S – Gás Sulfídrico

N<sub>2</sub> – Nitrogênio

NBR – Norma Brasileira aprovada pela ABNT

NH<sub>3</sub> – Amônia Livre

NH<sub>4</sub> – Íon Amônio

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RA – Região Administrativa

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SD – Sólidos Dissolvidos

SLU – Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal – SLU

SS – Sólidos em Suspensão

SSV – Sólidos em Suspensão Voláteis

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

# 1 INTRODUÇÃO

Para atender às pressões cada vez maiores da sociedade e das agências ambientais pela preservação ambiental, qualidade de vida e bem-estar social, o setor de saneamento básico que inclui, dentre outros serviços, a coleta e tratamento de esgotos sanitários e de resíduos sólidos urbanos nas cidades brasileiras, vem crescendo fortemente nos últimos anos, devido à grande expansão populacional das áreas urbanas (ANDREOLI, 2006).

Dessa forma, o setor de saneamento básico tem enfrentado grandes desafios no que diz respeito ao gerenciamento dos resíduos provenientes de processos de tratamento de esgotos sanitários (lodos) e resíduos sólidos urbanos (RSU). A Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), reforça as necessidades de ampliação dos investimentos na área do tratamento de resíduos, para que apenas os rejeitos sejam encaminhados a aterros sanitários.

O lançamento de resíduos sólidos não estabilizados em locais inadequados, além de uma prática ilegal, é um dos principais causadores de impactos no meio ambiente, pois a decomposição desses materiais libera substâncias altamente tóxicas, que contaminam o solo, água e ar, causando efeitos danosos incontroláveis e que só aumentam com o passar dos anos (ABRELPE, 2014).

Além dos aspectos legais, os aspectos econômicos e energéticos também devem ser levados em consideração, pois a disposição inadequada dos resíduos sólidos, conforme explicitado anteriormente, além de resultar em problemas ambientais muito sérios, acarreta perdas de matéria-prima e energia. Stasta *et al.* (2006) mencionam que o lodo gerado em estações de tratamento de esgotos tem um grande potencial de utilização como fonte de energia e combustível, dependendo do tipo de lodo e da concentração de sólidos voláteis, pois o seu poder calorífico inferior pode variar entre 8 e 12 MJ/kg para lodos desidratados e 14 a 23 MJ/kg para lodos brutos. Já a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), que representa cerca de 50 a 80% do peso total de RSU das cidades brasileiras, pode chegar a faixas de 22 MJ/m<sup>3</sup> de poder calorífico, como citado por Silveira *et al.* (2015).

Segundo os mesmos autores, uma forma de aproveitamento da energia disponível nos resíduos é a utilização de digestores anaeróbios. Os digestores estabilizam e reduzem o



volume de lodo a ser encaminhado para a disposição final, e convertem energia bioquímica em biogás.

A digestão anaeróbia é um processo de degradação biológica da matéria orgânica, em condições de ausência de oxigênio. Esse processo ocorre em várias etapas sequenciais, com grupos de microrganismos específicos que geram diversos produtos, entre eles se destacam o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), entre outros. A associação desses gases recebe o nome de biogás. Destes, o  $\text{CH}_4$  é o gás que possui potencial para aproveitamento energético, e por isso, quanto maior a fração de metano encontrada no biogás produzido, maior é a eficiência do sistema de digestão (SIQUEIRA *et al.*, 2015).

O aproveitamento energético do biogás nos processos de digestão de lodos de esgoto e FORSU se destaca mundialmente como alternativa tecnológica para o problema da destinação final ecologicamente adequada dos resíduos. Silveira *et al.* (2015) destacam que em países da Europa, a consolidação dessa tecnologia foi atrelada à regulamentação dos mercados de geração de energia e renda a partir dos resíduos orgânicos e seus subprodutos, fator fundamental para que essa tecnologia se estabeleça no Brasil.

Dessa forma, o principal objetivo desse trabalho foi a proposição de um conjunto de biodigestores anaeróbios para a co-digestão dos lodos gerados na ETE Brasília Norte e a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Propor e avaliar a possibilidade da implementação de digestores anaeróbios na ETE Brasília Norte utilizando Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos como co-substrato na digestão dos lodos gerados na ETE para substituir os digestores atualmente em operação.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar as características dos Lodos produzidos na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte;
- Avaliar características de geração e composição da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos produzidos nas regiões do Plano Piloto (Asa Sul e Asa Norte), Lago Norte, Varjão e SCIA - Estrutural, pela sua proximidade com a Estação de Tratamento em estudo;
- Avaliar as características e proporção volumétrica de mistura entre os lodos de esgoto e a FORSU para utilização como co-substrato em reatores anaeróbios;
- Pré-dimensionar um conjunto de reatores anaeróbios em escala real para atender a ETEB Norte e tratar a mistura entre lodo de esgoto e FORSU.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos - PNRS, Lei Federal nº 12.305/2010, estipula que o Distrito Federal e os municípios brasileiros devem possuir planos municipais para a gestão integrada dos resíduos sólidos gerados nos respectivos territórios. Esses planos municipais devem ser inseridos no plano de saneamento básico do município integrando também os outros serviços de saneamento, como água, esgoto e drenagem pluvial, previstos na Lei nº 11.445/2007.

A NBR 10.004 (2004) da Associação Brasileira de normas técnicas - ABNT, define resíduos sólidos como todos os resíduos resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, estejam eles no estado sólido ou semissólido. Essa definição engloba os lodos provenientes de estações de tratamento de esgotos, e os resíduos sólidos urbanos (RSU), que devem ter atenção especial quanto a sua gestão e disposição final, devido ao volume e grande quantidade de matéria orgânica presente nesses resíduos, que pode estar associada a riscos biológicos e contaminação. Pensando nisso, é essencial que alternativas tecnológicas sejam utilizadas, para que a disposição final desses resíduos seja ambientalmente adequada, como estipula a PNRS.

Uma tecnologia que merece destaque nessa área é a digestão anaeróbia, que consiste em um processo que ocorre na ausência de oxigênio livre, mediada por diversos tipos de microrganismos que, em associação, convertem a matéria orgânica complexa em metano ( $\text{CH}_4$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), e novas células. A aplicação da digestão anaeróbia no tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) e dos lodos de esgoto provenientes das estações de tratamento de esgotos, se mostra como uma alternativa viável, uma vez que além da estabilização da biomassa, o biogás produzido no processo pode ser utilizado como alternativa energética.

Silveira *et al.* (2015) citam que o potencial energético do biogás está relacionado com a concentração de gás metano em sua composição, que, por sua vez, varia com a composição da matéria orgânica utilizada no processo de digestão. O poder calorífico inferior do metano puro é de  $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ , porém um biogás com 60% de metano tem poder calorífico de  $21,5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ , o que corresponde a 67% do poder calorífico inferior do gás natural.

### 3.1 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A degradação da matéria orgânica pela via anaeróbia apresenta um certo grau de complexidade, pois para que a degradação ocorra, é necessário um sistema ecológico delicadamente balanceado, com funções diferenciadas (SANT'ANNA JR, 2011).

Chernicharo (2007) explica que a digestão anaeróbia pode ser considerada como um processo de dois estágios. No primeiro estágio, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias formadoras de ácidos, as bactérias fermentativas, convertem os compostos orgânicos complexos em outros compostos mais simples. No segundo estágio ocorre a conversão de ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos, como o metano e o gás carbônico. Essa segunda etapa é realizada por um grupo especial de organismos estritamente anaeróbios, as arqueas metanogênicas, que são muito sensíveis às variações nas condições ambientais e possuem uma baixa taxa de crescimento quando comparadas aos demais grupos de microrganismos que participam do processo anaeróbio, representando, portanto, um fator limitante no processo de digestão como um todo.

As duas fases principais do processo de digestão podem ser subdivididas em quatro etapas, explicadas a seguir (Figura 3.1).

**Hidrólise:** As bactérias fermentativas não conseguem assimilar os compostos orgânicos complexos (polissacarídeos, proteínas, lipídeos, ácidos nucleicos), e por isso, nessa fase, liberam enzimas hidrolíticas extracelulares, capazes de transformar a matéria orgânica complexa em substâncias de menor massa molar e complexidade (monossacarídeos, aminoácidos, glicerol, purinas e outros).

**Acidogênese:** Os produtos solúveis produzidos na fase anterior são assimilados pelas células das bactérias fermentativas, e convertidos em compostos mais simples, como ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido lático, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, que serão excretados pelas células.

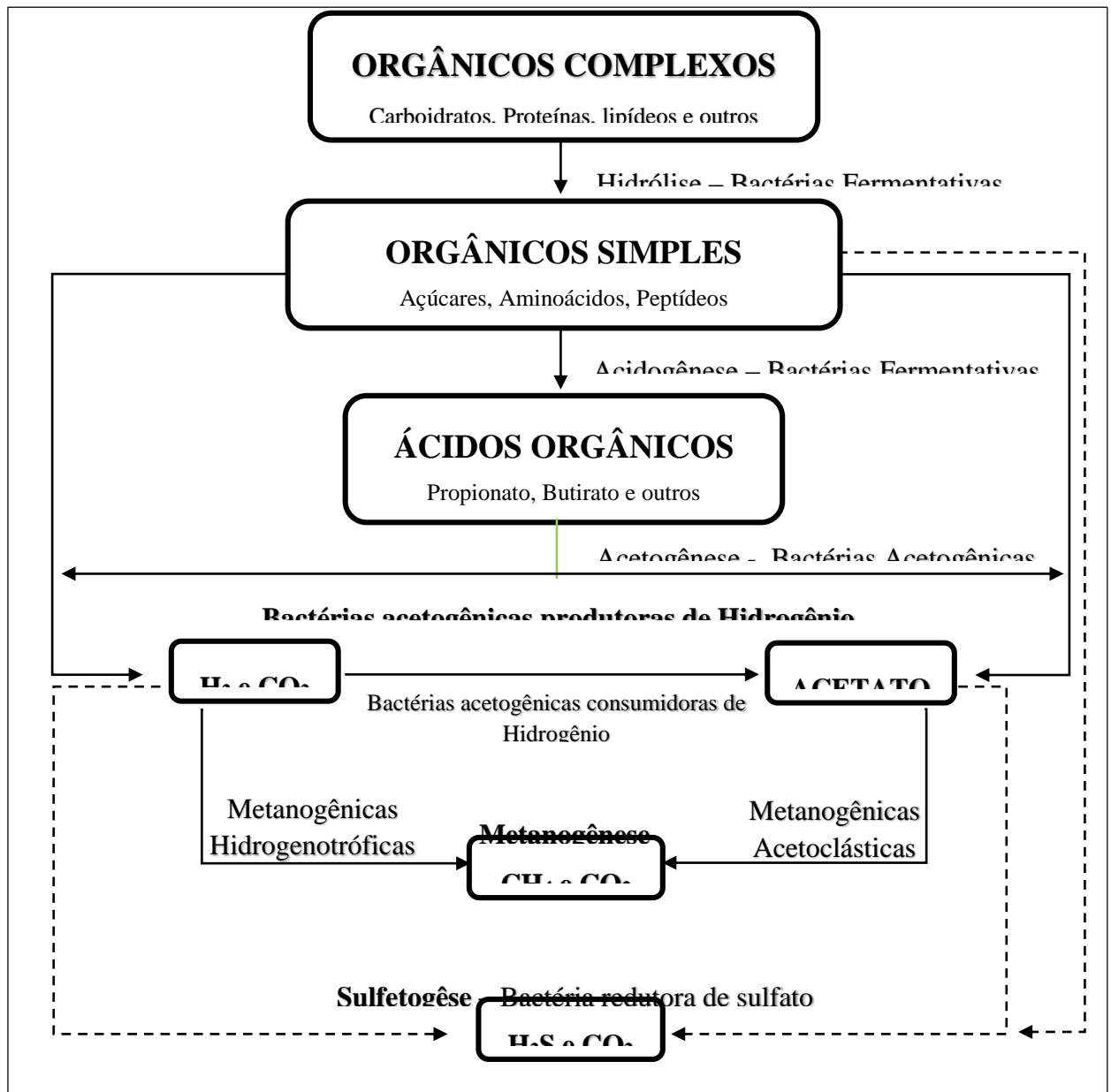


Figura 3.1. Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia com redução de sulfato (CHERNICHARO, 2007).

**Acetogênese:** Nessa fase, um outro grupo de bactérias, as acetogênicas, oxidam os produtos gerados na fase anterior (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Esses produtos são essenciais para o metabolismo das arqueas metanogênicas da fase seguinte.

**Metanogênese:** A etapa final do processo de degradação anaeróbia é efetuada pelas arqueas metanogênicas. Existem dois grupos de arqueas metanogênicas que participam da fase de metanogênese. O grupo das acetoclásticas, responsáveis por cerca de 60 a 70% da produção

de metano, utiliza o acetato, transformando-o em metano e dióxido de carbono; e o grupo das hidrogenotróficas, que são capazes de produzir metano a partir de dióxido de carbono e hidrogênio.

**Sulfetogênese:** Dependendo da composição química do composto a ser tratado, existe ainda uma quinta fase: a sulfetogênese. Nessa fase, o sulfato e outros compostos à base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons por bactérias sulforredutoras durante a oxidação dos compostos orgânicos, e são reduzidos a sulfetos. Nessa conversão, as bactérias sulforredutoras utilizam muitos dos compostos intermediários, formados nas rotas metabólicas das fases anteriores, e passam a competir pelos substratos disponíveis com as bactérias fermentativas, acetogênicas e as arqueas metanogênicas.

### 3.2 FATORES INTERVENIENTES NO PROCESSO ANAERÓBIO

Segundo Chernicharo (2007), um controle rigoroso das condições ambientais é importante para um bom funcionamento dos digestores anaeróbios, pois o processo requer uma boa interação entre as comunidades microbianas fermentativas e metanogênicas. O grupo das arqueas metanogênicas é o mais sensível a mudanças das condições ambientais, e por isso, este grupo deve receber uma atenção especial e as condições ideais para o seu desenvolvimento devem ser priorizadas. Para isso, algumas características físicas, químicas e biológicas são subsídios essenciais para um bom equilíbrio do processo. A seguir serão apresentadas as características mais importantes:

**Teor de Umidade:** De forma geral, os microrganismos precisam de um meio líquido para o seu crescimento e sobrevivência. Segundo Castilho Jr (2006), a água promove a diluição de agentes inibidores, possibilita a solubilização dos substratos e a distribuição de microrganismos e nutrientes, principalmente na fase de hidrólise. No caso da FORSU o teor de umidade varia em função de alguns fatores como a composição do resíduo e as condições climáticas. Segundo Lima (1988), o teor de umidade médio dos RSU Brasileiros está em torno de 60%, porém nos períodos chuvosos este percentual pode elevar-se para 75%. Já para os lodos, o teor de umidade pode chegar a 98%, segundo Metcalf & Eddy (2016).

**Temperatura:** Nayono (2010) cita que a temperatura é um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito à digestão anaeróbia, pois é fator decisivo na taxa de degradação do processo anaeróbio, principalmente nas fases de hidrólise e metanogênese. Além disso, a

temperatura também influencia outros fatores como as taxas de transferência de gás e as características de sedimentação dos biossólidos.

Existem duas faixas operacionais de temperatura em que a digestão anaeróbia ocorre de forma mais apropriada: a faixa mesofílica, com temperatura ótima em cerca de 35°C e a termofílica, com temperaturas próximas dos 55°C. Sant'Anna Jr (2011) descreve que a digestão pode ocorrer em temperaturas mais baixas (<20°C), na faixa psicrófila, porém esse processo se dá com taxas de digestão muito baixas.

As bactérias fermentativas têm sua taxa máxima de crescimento (100%) nas condições termofílicas, porém como essa faixa de temperatura é muito estreita, uma pequena alteração na temperatura, pode levar a um desequilíbrio desses microrganismos dentro do sistema.

Por isso, apesar da menor eficiência, as bactérias fermentativas também atuam bem nas condições mesofílicas, com 65% de crescimento ótimo. Silveira *et al.* (2015) recomenda que se utilize o processo mesofílico, pois alterações bruscas na temperatura não representam grande influência na eficiência do sistema. Além disso, Chernicharo (2007) cita que o alto custo de energia para manter e controlar a temperatura e a instabilidade do processo são fatores limitantes do processo termofílico.

**pH:** A fase acetogênica da decomposição anaeróbia ocorre na faixa ótima de pH entre 5,0 e 6,0, tendo tolerância para valores de pH de até 4,5. Já as arqueas metanogênicas possuem atividade na faixa estreita de pH, de 6,8 a 7,5. Valores de pH muito baixos indicam uma maior atividade de bactérias fermentativas no sistema, e inibem o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, por essa razão o controle de pH é essencial para o equilíbrio entre os microrganismos do sistema (CHERNICHARO, 2007).

**Alcalinidade e ácidos voláteis:** A alcalinidade de maior relevância para o processo anaeróbio, a de bicarbonatos, pois esta é importante para o tamponamento do ácido carbônico, que é produzido em grandes quantidades dentro do reator. Metcalf & Eddy (2016) citam que a alcalinidade é proporcional à concentração de sólidos adicionados ao reator, e varia entre 2.000 e 5.000 mg/L em digestores com regime permanente. Para se avaliar a capacidade de tamponamento, recomenda-se um monitoramento da relação entre ácidos orgânicos voláteis e alcalinidade dentro do sistema, que devem variar entre 0,05 e 0,25, sendo 0,1 um valor considerado ótimo.

**Tamanho das partículas:** O tamanho das partículas tem relevância significativa no processo de hidrólise. Este parâmetro é importante quando se trabalha com a digestão anaeróbia da FORSU, uma vez que quanto menores forem as partículas, maior é a área superficial de contato, disponível para a atividade enzimática e quebra dos compostos em moléculas menores (Bidone e Pivinelli, 1999).

**Concentração da matéria orgânica de substratos:** Chernicharo (2007) explica que para substratos com elevado teor de sólidos, a concentração da matéria orgânica pode ser caracterizada pela relação entre o teor de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV). Estes parâmetros podem ser convertidos em valores de DQO, que é o equivalente ao oxigênio necessário para a oxidação da matéria orgânica por meios químicos. Um balanço de DQO dentro do sistema serve para diferenciar de forma quantitativa os seus três principais destinos no processo anaeróbio: a conversão de DQO em metano (cerca de 50 a 70%); a conversão da DQO em biomassa, correspondente ao crescimento da população microbiana (5 a 15%); e a permanência da DQO no efluente (10 a 30%), que representa a biomassa não retida no reator, bem como os compostos que não foram degradados anaerobicamente, e compostos intermediários, como os ácidos orgânicos. No tratamento anaeróbio, a DQO é utilizada principalmente para o cálculo da geração específica de biogás no processo.

**Concentração de nutrientes no substrato:** Alguns nutrientes devem ser fornecidos em quantidades suficientes para as necessidades nutricionais das arqueas metanogênicas. De acordo com Chernicharo (2007), esses nutrientes são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina, e vitamina B<sub>12</sub>.

O nitrogênio é o nutriente principal para o crescimento da biomassa. Nogueira (1986) cita que os microrganismos necessitam de nitrogênio para sintetizar proteínas, e para que elas sejam capazes de consumir toda a matéria orgânica, deve existir uma correta proporção entre o carbono e o nitrogênio. A relação carbono/nitrogênio permite avaliar se estes formam um substrato balanceado para a atividade biológica de degradação.

De forma semelhante, o fósforo é necessário para o metabolismo das células bacterianas, porém em menor proporção. O excesso de fósforo não produz consequências significativas, mas a sua ausência inibe o processo. Chernicharo (2007) cita que a relação de DQO:N:P para a biomassa anaeróbia crescer varia entre 350-1.000:5:1. Além disso, Bidone & Povinelli (1999) comentam que baixas concentrações de nitrogênio aumentam a relação C/N, e a



atividade metabólica é reduzida ou cessa. Por outro lado, se a relação C/N for baixa, e houver muito nitrogênio no sistema, este não será consumido e se acumulará na forma de amônia ( $\text{NH}_3$ ), cujos altos teores podem inibir o crescimento das arqueas metanogênicas.

Outros nutrientes como enxofre, ferro, cobalto, níquel e molibdênio são da mesma forma essenciais para o desenvolvimento dos microrganismos. Esses nutrientes geralmente estão naturalmente disponíveis na maioria dos resíduos orgânicos e não se sabe ao certo a sua exigência exata no sistema, a não ser pelo enxofre, que exige concentrações próximas às do fósforo.

**Substâncias Inibidoras e tóxicas:** Silveira *et al.* (2015) explicam que a inibição é uma redução reversível da atividade microbiana, enquanto que a toxicidade é irreversível. As substâncias sobre as quais se deve ter mais controle e cuidado na digestão anaeróbia são o oxigênio, o nitrogênio amoniacal, os compostos sulfurados, os ácidos orgânicos e os metais pesados.

Como as arqueas metanogênicas são estritamente anaeróbias, a presença de oxigênio dentro do sistema pode ter caráter tóxico. Uma pequena quantidade de oxigênio é tolerada, pois os microrganismos responsáveis pela hidrólise e acidogênese, que são facultativos, são capazes de consumir rapidamente pequenas quantidades de oxigênio que porventura entrem no sistema.

Outra substância que merece atenção especial é o enxofre. Como citado anteriormente, apesar da essencialidade desse nutriente para o crescimento celular das arqueas metanogênicas, compostos ricos em enxofre provocam um aumento exacerbado da comunidade de bactérias sulforredutoras, que competem com as arqueas metanogênicas. Por esse motivo, é importante o constante monitoramento da concentração de sulfatos dentro do sistema. Além disso, sistemas com grande concentração de compostos sulfurados apresentam uma produção elevada de gás sulfídrico, fator causador de corrosões, maus odores, e toxicidade no ambiente dos reatores, além de diminuir a eficiência do sistema (CHERNICHARO, 2007).

O nitrogênio amoniacal, por sua vez, deve ser monitorado no sistema pois excesso de amônia, tanto na forma de íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) quanto na forma de amônia livre ( $\text{NH}_3$ ), em elevadas concentrações, se tornam inibidores.

A concentração de ácidos orgânicos possui uma estreita relação com o pH, alcalinidade e equilíbrio biológico do sistema. O acúmulo de ácidos orgânicos significa que a atividade das bactérias acidogênicas está sendo privilegiada em relação às metanogênicas, e causando um desequilíbrio no sistema. Os metais pesados, por sua vez, são substância tóxicas aos microrganismos.

A digestão anaeróbia, em estações de tratamento de esgoto de grande porte, geralmente é utilizada para o tratamento dos lodos gerados pelo tratamento convencional dos esgotos domésticos afluentes, como explicado a seguir.

### 3.3 LODOS PRODUZIDOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS QUE UTILIZAM O SISTEMA DE LODOS ATIVADOS

Na Figura 3.2 é apresentado um fluxograma típico dos processos que ocorrem em uma estação de tratamento por lodos ativados.

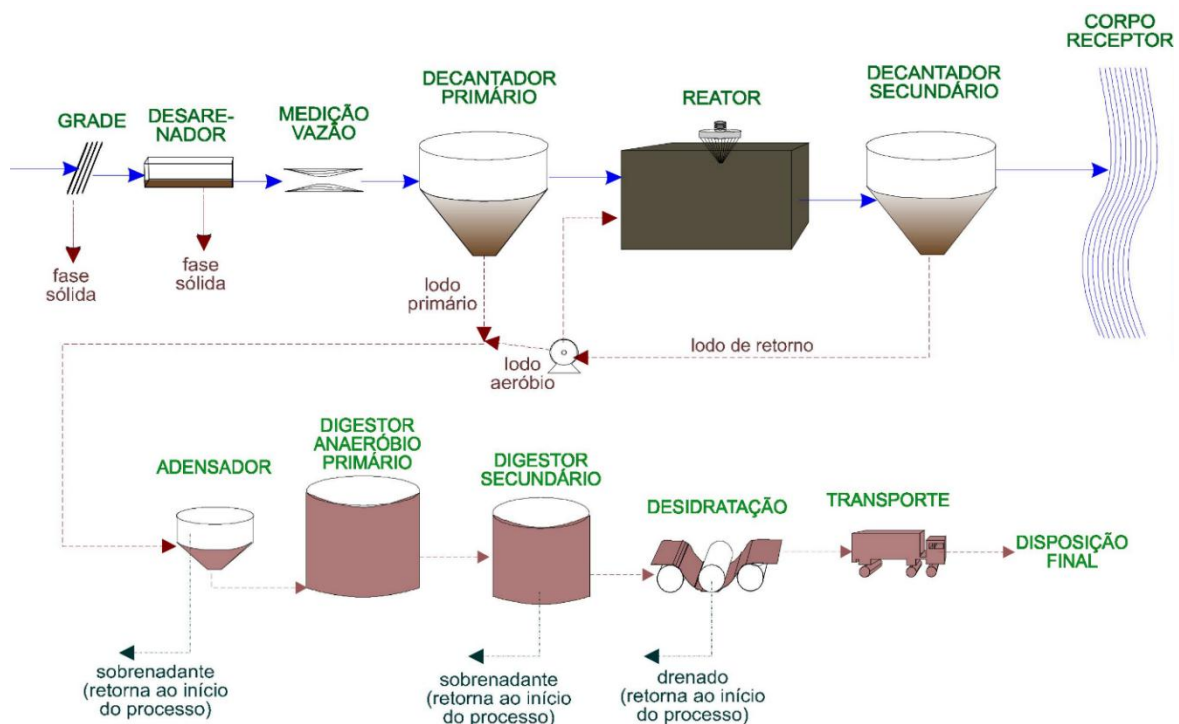


Figura 3.2. Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional (von Sperling, 1997).

São diversos os resíduos que chegam a uma estação de tratamento de esgotos por meio das redes de esgotamento sanitário. Segundo Jordão & Pessoa (2014), os resíduos sólidos de fácil retenção e remoção passam por um processo de tratamento preliminar e são removidos

através de operações físicas de gradeamento, peneiramento, e remoção de areia (Figura 3.2). Esses sólidos são considerados rejeitos e enviados para disposição final em aterro sanitário.

O esgoto sanitário, como ilustrado na Figura 3.3, é composto por cerca de 99,9% de água. O resto, 0,1% do volume, é composto por sólidos. Destes, aproximadamente 70% são constituídos de matéria orgânica (proteínas, carboidratos, óleos e graxas, etc), enquanto os outros 30% estão na forma inorgânica (metais, sólidos inertes, sólidos inorgânicos, compostos não biodegradáveis, etc.). Nos sólidos também podem ser encontrados nutrientes (nitrogênio e fósforo, entre outros), microrganismos patogênicos, e em alguns casos, contaminantes tóxicos oriundos de atividades industriais ou aportes acidentais e clandestinos às redes coletoras (Melo e Marques, 2000).

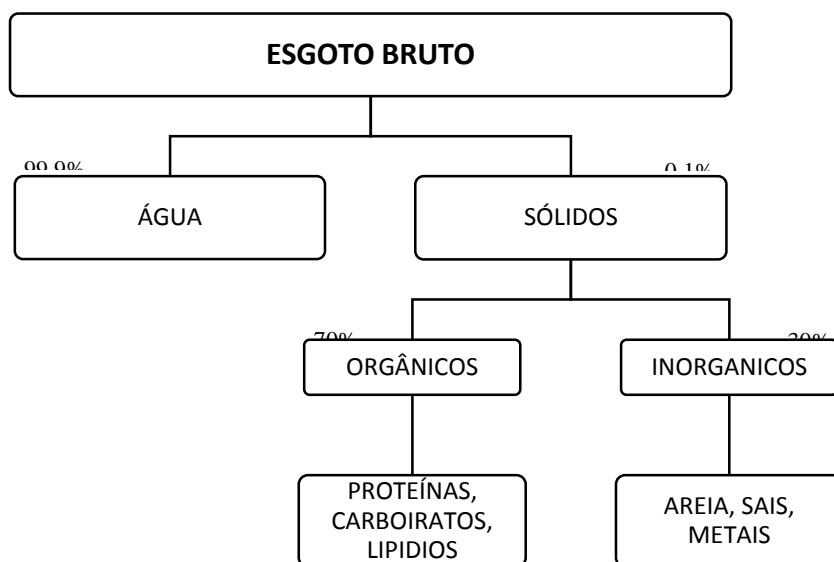


Figura 3.3. Composição típica do esgoto doméstico (Melo e Marques, 2000).

Os sólidos podem ser classificados, segundo seu tamanho e estado, em sólidos em suspensão (SS) ou sólidos dissolvidos (SD); segundo suas propriedades químicas, em voláteis ou fixos e, segundo suas propriedades de sedimentação, em sedimentáveis e não sedimentáveis. A fração sedimentável é removida, em sistemas de lodos ativados, no nível primário do tratamento, por meio de decantadores primários. Esse resíduo é conhecido como lodo primário, e consiste basicamente em material orgânico particulado.

A parcela não sedimentável é submetida ao tratamento a nível secundário, e removida por processos de oxidação biológica em reatores aerados, seguida de sedimentação em

decantadores secundários. Von Sperling (1997) cita que no tratamento por lodos ativados, parte do material retido nos decantadores secundários é recirculado no reator, com o objetivo de aumentar a concentração de biomassa dentro do tanque de aeração, para que haja um maior contato entre a biomassa e a matéria orgânica, aumentando assim a eficiência de degradação da matéria orgânica. O lodo excedente é removido nos decantadores secundários, e diferentemente do lodo primário, consiste basicamente em material biológico. Geralmente, nas estações de tratamento de esgotos por lodos ativados, o lodo primário é misturado ao lodo secundário e a essa mistura dá-se o nome de lodo misto.

As vantagens da utilização do sistema de lodos ativados em ETEs de grandes centros urbanos são as menores áreas requeridas, se comparado a outros tipos de tratamento, e a maior eficiência na remoção de matéria orgânica. A grande desvantagem desse sistema é que ele demanda um elevado consumo de energia elétrica, e por ser um processo complexo, exige um certo grau de especialização da mão-de-obra de operação e manutenção.

De acordo com Metcalf & Eddy (2016), além do alto teor de matéria orgânica e biomassa, os resíduos removidos nos decantadores primários e secundários contêm grandes concentrações de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, entre outros. Por essa razão, esses resíduos são classificados pela NBR 10.004/2004 como resíduos classe II A – não inertes, e podem influenciar nas características do solo ou da água, se dispostos de forma inadequada, apresentando grande potencial de danos ao meio ambiente.

Tendo isso em vista, é fundamental que se realize o manejo adequado dos lodos, através de processos de adensamento, digestão e desidratação, como ilustrado na Figura 3.3. Observa-se, porém, que o processamento do lodo, seu reuso e disposição final, de todos os constituintes removidos pelo tratamento de esgoto, é de longe o problema mais complexo no tratamento de efluentes, devido não só aos fatores citados anteriormente, mas também ao grande volume gerado, proveniente de uma produção cada vez mais acentuada, que é provocada principalmente pela crescente urbanização e expansão dos serviços de coleta e tratamento (Andreolli, 2006).

Von Sperling (1997) explica que cada tipo de lodo tem características próprias, que variam de acordo com a região atendida, o nível socioeconômico da população, o tempo entre a sua geração e o processamento, e o tipo de processamento ao qual o lodo foi submetido.

A matéria orgânica presente no lodo é geralmente expressa em termos da concentração de sólidos secos em porcentagem, e da relação entre os sólidos voláteis e sólidos totais, em % SV/ST. Outras características físicas e químicas dos lodos, como alcalinidade, pH, concentração de ácidos orgânicos, entre outros, são importantes para a definição final do lodo processado e do líquido removido durante o tratamento. Na Tabela 3.1 são apresentadas as faixas e valores típicos de parâmetros químicos e físicos geralmente observados nos lodos primário, secundário e misto que ainda não foram submetidos a nenhum processo de tratamento, e do lodo já digerido.

Tabela 3.1. Composição química dos lodos primário, secundário e misto não tratados e do lodo digerido anaerobicamente (Metcalf & Eddy, 2016).

Item	Lodo Não Tratado						Lodo digerido	
	Lodo Primário		Lodo ativado		Lodo misto			
	Faixa	Típica	Faixa	Típica	Faixa	Típica	Faixa	Típica
Teor de sólidos secos (% de ST)	1 - 6	3	0,4 - 1,2	0,8	2 - 8	5	6 - 12	10
Sólidos Voláteis (% de ST)	60 - 85	75	60 - 85	70	60 - 80	65	30 - 60	40
Graxas e Gorduras (% de ST)	5 - 8	6	5 - 12	8	6 - 30	-	5 - 20	18
Proteínas (% de ST)	20 - 30	25	32 - 41	36	20 - 30	25	15 - 20	18
Nitrogênio (N, % de ST)	1,5 - 4	2,5	2,4 - 5	3,8	1,5 - 4,0	2,5	1,6 - 6,0	3
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % de ST)	0,8 - 2,8	1,6	2,8 - 11	5,5	0,8 - 2,8	1,6	1,5 - 4,0	2,5
Potássio (K <sub>2</sub> O, % de ST)	0 - 1	0,4	0,5 - 0,7	0,6	0,0 - 1,0	0,4	0,0 - 3,0	1
Celulose (% de ST)	0 - 15	10	-	-	8 - 15	10	8 - 15	10
Ferro (exceto na forma de sulfeto)	2 - 4	2,5	-	-	2,0 - 4,0	2,5	3,0 - 8,0	4
Sílica (SiO <sub>2</sub> , % de ST)	15 - 20	-	-	-	15 - 20	-	10 - 20	-
pH	5 - 8	6	6,5 - 8	7,1	5,0 - 8,0	6	6,5 - 7,5	7
Alcalinidade (mg/L como CaCO <sub>3</sub> )	500 - 1500	600	580 - 1100	790	500 - 1500	600	2500 - 3000	3000
Ácidos orgânicos (mg/L como Hac)	200 - 2000	500	1100 - 1700	1350	200 - 2000	500	100 - 600	200
Poder energético, kJ/kg SSV	23.000 - 29.000	25.000	19.000 - 23.000	20.000				

Além dos parâmetros químicos, as quantidades de lodo produzidas nos diferentes processos e operações, e a concentração de sólidos, são fatores importantes para o projeto de sistemas

de tratamento de lodo. Uma vez que o lodo é basicamente composto por água, sólidos fixos e sólidos voláteis, fatores como a densidade, carga de sólidos, e a relação entre o teor de sólidos e a umidade tem influência nas propriedades mecânicas do lodo, interferindo principalmente no seu volume, manuseio e disposição final.

Valores típicos para as características físicas, quantidades produzidas e respectivas concentrações de sólidos nos diferentes tipos de lodo são apresentados na Tabela 3.2.

### **3.3.1 Tratamento do lodo**

Fernandes (2000) explica que quanto maior for a semelhança do lodo com a matéria orgânica “fresca”, maior será o seu potencial de degradação, que produz odores desagradáveis. À medida que o lodo é digerido e estabilizado, os componentes orgânicos mais facilmente degradáveis são transformados, e o lodo passa a apresentar odor menos ofensivo, pois adquire características de lodo estabilizado.

Segundo Metcalf & Eddy (2016), de toda a energia química disponível no sistema, apenas uma fração da energia que chega nas unidades de processamento de sólidos pode ser recuperada, como ilustrado na Figura 3.4. Cerca de 30 a 40% da energia disponível no esgoto bruto é removida na forma de lodo primário, e 25 a 30% é transformado em biomassa na forma de lodo secundário após o tratamento biológico. Destes, 15 a 35% podem ser aproveitados na forma de biogás, e outros 15 a 35% saem do sistema na forma de lodo digerido, ou biossólidos.

A composição típica do biogás proveniente da digestão anaeróbia de um lodo é de 55 a 70% de metano, 30 a 40% de dióxido de carbono, pequenas quantidades de  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ , vapor d'água e outros gases. A produção típica de biogás varia entre 0,75 e 1,12  $m^3/kg$  de sólidos voláteis degradados, e a quantidade de energia disponível varia entre 22 e 24  $MJ/m^3$ . O teor de metano depende principalmente do pH dentro do digestor, pois este afeta a quantidade de gás carbônico liberada para a fase gasosa.

Tabela 3.2. Dados típicos para as características físicas, quantidades de lodos produzidos e concentração de sólidos em diferentes operações e processos utilizados em estações de tratamento de efluentes (Metcalf & Eddy, 2016 - Adaptado)

Operação ou processo de tratamento	Densidade do sólido	Densidade do lodo	Sólidos secos kg/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		Concentração de sólidos, % de sólidos secos		Características
			Faixa	Típica	Faixa	Típica	
<b>Lodo primário</b>	1,4	1,02	110 - 170	150	1 – 6	3	Coloração acinzentada, aspecto pegajoso, em muitos casos possui odor desagradável. É facilmente digerido em condições de operação adequadas
<b>Lodo secundário</b>	1,25	1,05	70 - 100	80	0,5 - 1,5	0,8	Aspecto floculento e coloração marrom. Se a cor do lodo for mais escura, ele pode estar se tornando séptico; se for mais clara, significa que a aeração está sendo insuficiente e o lodo irá sedimentar mais lentamente.
<b>Lodo químico</b>					3 – 4,5		Apresenta coloração escura, porém sua superfície pode ser vermelha se houver muito ferro. Aspecto pegajoso e gelatinoso, e possui odor objetável, mas menos desagradável que o odor do lodo primário.
<b>Lodo digerido anaerobiamente</b>							Cor marrom-escuro para preto, com uma quantidade significativa de gás. Não é ofensivo quando completamente digerido, e o odor é pouco perceptível, similar a borracha queimada ou cera.

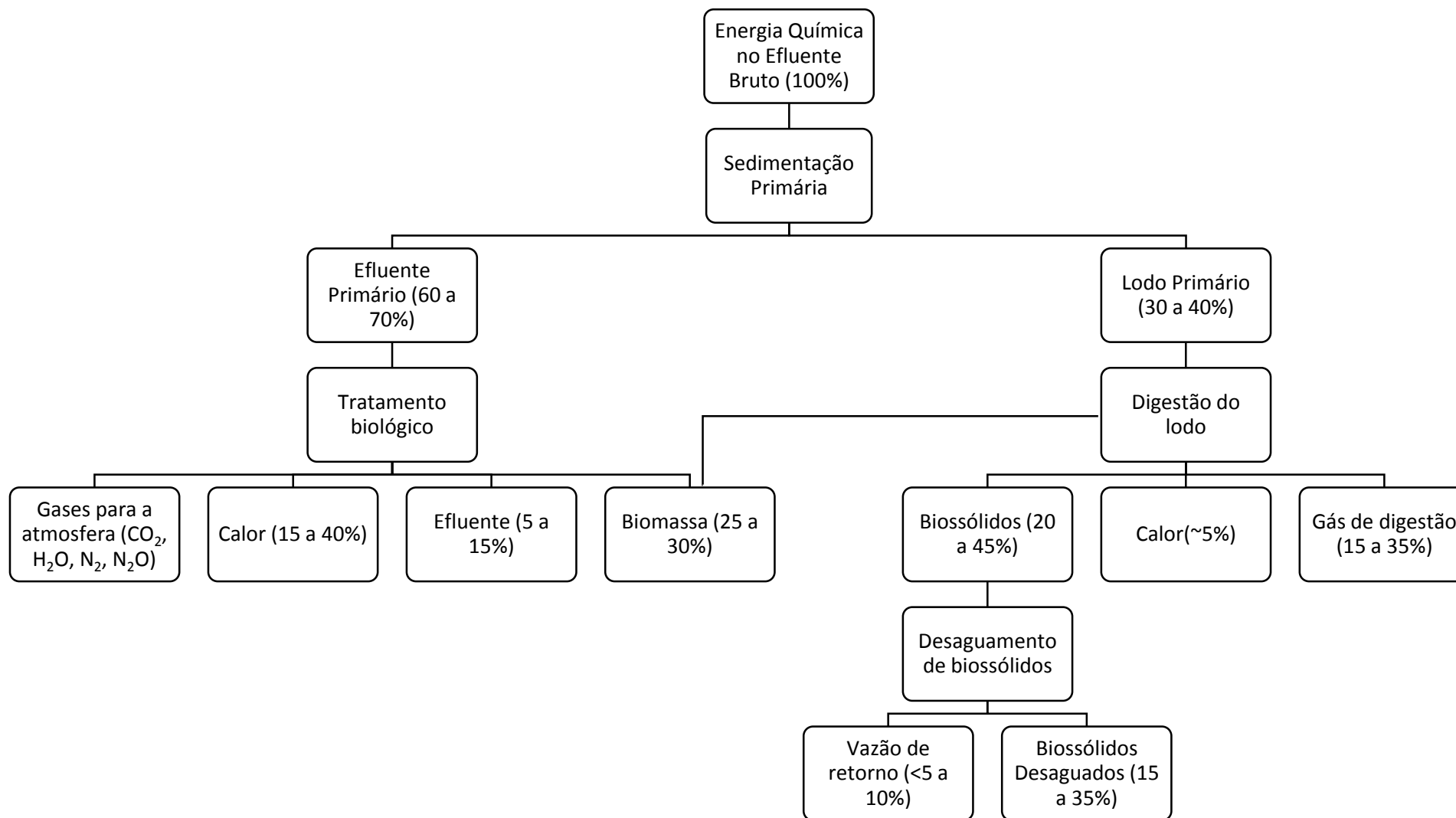


Figura 3.4. Distribuição da energia química no tratamento de efluentes com lodos ativados e digestão anaeróbia de lodos (Metcalf & Eddy, 2016)



### 3.3.2 Modelos de biodigestores anaeróbios

A digestão anaeróbia ocorre naturalmente em diversos ecossistemas naturais. Cetesb (2004) cita que nestes ecossistemas o fluxo de energia flui e reflui, e assim os organismos crescem, reproduzem-se e se adaptam a mudanças. Os ecossistemas urbanos, por outro lado, têm menor capacidade de assimilar resíduos, então, os reatores anaeróbios foram criados, com o intuito de reproduzir os fenômenos naturais no meio urbano, de forma compacta e eficiente.

Os biodigestores são câmaras fechadas onde o material orgânico é adicionado, em solução aquosa, para ser submetido à decomposição, gerando o biogás que irá se acumular na parte superior (DEGANUTTI *et al*, 2002). São reatores biológicos de concepção relativamente simples e barata, de fácil operação e manutenção, e que geralmente não necessitam de grandes áreas para a sua instalação. Como não necessitam de oxigênio para operar, seu uso traz uma série de vantagens, como a diminuição dos custos com motores, bombas e aeradores. Além disso, os digestores anaeróbios podem receber altas concentrações de cargas orgânicas, e são capazes de diminuir e estabilizar os teores de sólidos, além de reduzir odores e microrganismos patogênicos. A captura, o aproveitamento energético do gás de digestão gerado, e a redução da poluição atmosférica também são vantagens dos biodigestores anaeróbios (WILKIE, 2004).

Apples *et al*. (2008) explica que existem três tipos principais de digestores anaeróbios: o digestor de taxa padrão (Figura 3.5-a), o digestor de alta taxa (Figura 3.5-b), e o digestor de dois estágios (Figura 3.5-c). Gadelha (2005) cita que os principais parâmetros que influenciam a escolha e classificação dos projetos de digestores anaeróbios são o número de estágios e a concentração de sólidos totais (%ST). Metcalf & Eddy (2015), por outro lado, mencionam que o tempo de retenção de sólidos, o tempo de detenção hidráulica e a temperatura são fundamentais para a seleção do processo de digestão.

Souza e Lage Filho (2014) alegam que os primeiros reatores anaeróbios foram concebidos para tratar resíduos semissólidos como estrume de animais, lixo doméstico e para a estabilização de lodos provenientes dos tratamentos primários e secundário de efluentes. Esses reatores eram denominados reatores convencionais de taxa padrão, e eram basicamente tanques simples, sem aquecimento ou mistura de lodos e com tempos de retenção variando de 15 a 60 dias.

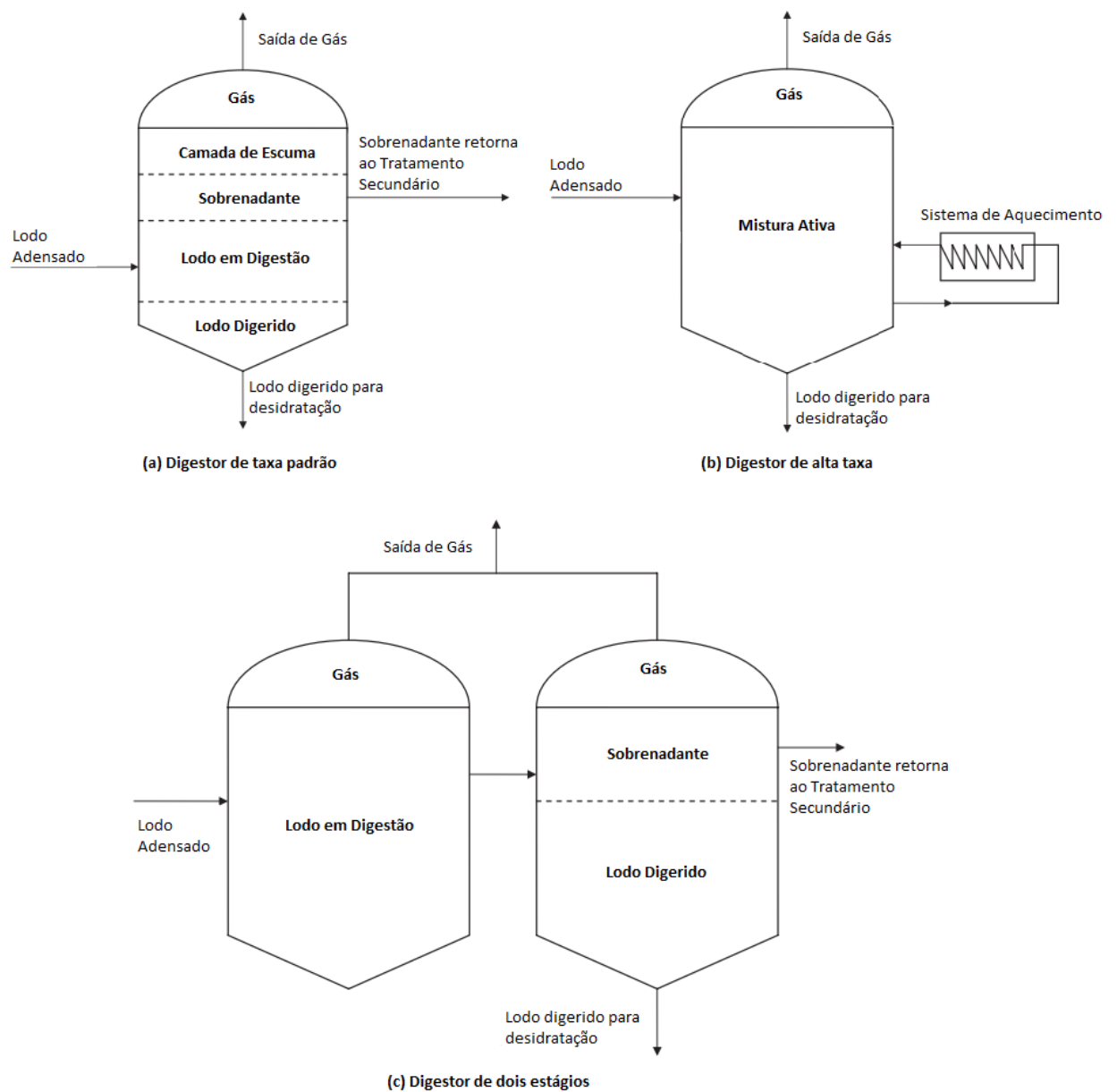


Figura 3.5. Tipos de digestores anaeróbios (Apples *et al.*, 2008 - Adaptado)

Segundo Cetesb (2006), os digestores convencionais mais utilizados no Brasil, principalmente em comunidades rurais de pequeno e médio porte, são os digestores indiano e chinês (Figura 3.6). Esses digestores são indicados para o uso de diferentes resíduos orgânicos animais e vegetais, requerem carregamento periódico, geralmente diário, e manejo do resíduo, e exigem um tempo de retenção hidráulica geralmente de 30 a 50 dias. O biodigestor indiano (Figura 3.6-a) possui uma cúpula móvel de ferro ou fibra de vidro, que serve para o armazenamento e liberação do gás, que é formado continuamente. O biodigestor chinês (Figura 3.6-b), por sua vez, possui uma câmara cilíndrica de alvenaria e um teto abobado e impermeável, onde o biogás é armazenado.

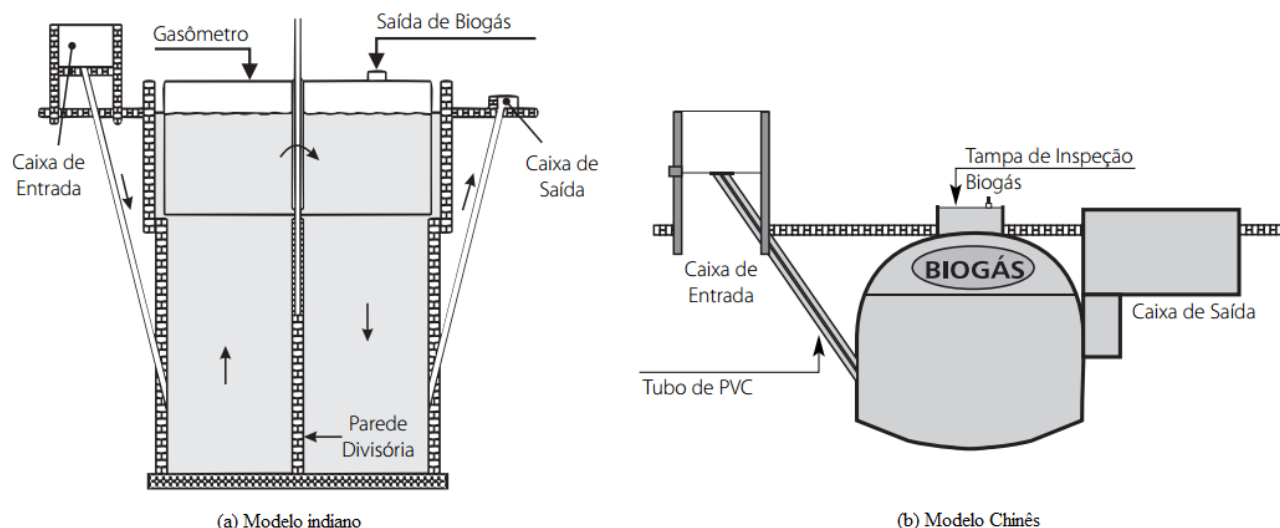


Figura 3.6. Modelos de biodigestores mais utilizados no Brasil (CETESB, 2006).

Outro grupo de digestores, os de alta taxa (Figura 3.5-b) são reatores mais modernos, que se baseiam no princípio de acúmulo de biomassa dentro do reator, pela sua retenção ou recirculação. Assim, o tempo de retenção do líquido é diferente e independente do tempo de retenção do lodo, possibilitando o tratamento de efluentes em tempo de retenção hidráulica reduzida (3 horas a 5 dias). Nesses digestores, o lodo é misturado por um sistema específico, que pode ser por recirculação de gás, bombeamento ou misturadores por aspersão em tubos, e a alimentação deve ser uniforme, com o bombeamento contínuo do lodo para o digestor, ou em ciclos com intervalos de 30 minutos a 2 horas, não ocorrendo separação de espuma e sobrenadante. Esses digestores devem possuir ainda coberturas fixas ou flutuantes com capacidade de armazenamento do biogás em excesso. O gás produzido pode ser armazenado, como alternativa, em um tanque de armazenagem de baixa pressão ou pode ser comprimido.

Por último, tem-se o digestor de dois estágios (Figura 3.5-c). Neste, o digestor de alta taxa é acoplado a um segundo tanque, geralmente conhecido como digestor secundário, que é utilizado para estocar os sólidos digeridos e o gás produzido, e também decantar o sobrenadante. Segundo Metcalf & Eddy (2015), embora esse tipo de tecnologia tenha sido muito utilizado no passado, não é mais empregada em projetos modernos, principalmente porque o segundo tanque não apresenta um benefício significativo no processo de digestão, do ponto de vista operacional, e por isso o custo de construção, que é elevado, não justifica a implantação de um tanque que não é completamente utilizado. Além disso, Apples *et al.* (2008) não recomendam a utilização de digestores de dois estágios porque muitas vezes o

sobrenadante do segundo reator pode apresentar uma grande concentração de sólidos suspensos, geralmente associados a uma digestão incompleta no primeiro reator.

Metcalf & Eddy (2015) citam ainda que para o projeto de digestores de alta taxa, em termos de tamanho do digestor, são utilizados alguns métodos, baseados no tempo de retenção de sólidos, na utilização de fatores de carga volumétrica, na destruição de sólidos voláteis, na redução de volume e nos fatores de carga baseados na população atendida.

Quanto ao formato, os digestores mais utilizados são de geometria cilíndrica vertical, funo cônico e cobertura flutuante. Digestores com formato oval ou de configuração padrão alemã, que consiste em um vaso cilíndrico profundo, com fundo e cobertura na forma de cone, também são encontrados, porém com menor frequência. Os digestores cilíndricos geralmente possuem diâmetro entre 6 e 38 m. O nível do fluido deve ser superior a 7,5 m e pode chegar a 15 m. O fundo do digestor deve ser cônico e possuir uma inclinação mínima de 10° para possibilitar a remoção do lodo. Os sistemas de mistura por injeção de gás liberam bolhas de gás que sobem até a superfície do líquido, arrastando e movimentando o lodo, esses sistemas, porém, geralmente apresentam desgaste e entupimento dos equipamentos e interferência na operação, causada pela presença de trapos e retalhos de outros tipos de materiais, não sendo adequados para a co-digestão.

Os misturadores mecânicos, por sua vez, geralmente utilizam turbinas ou misturadores de baixa velocidade, que deslocam o lodo, misturando o conteúdo do digestor, e apresentando boa eficiência de mistura.

Segundo Lopes (2013), recomenda-se a utilização de dois tipos de misturadores: o de fluxo axial e o de fluxo radial. O misturador com movimento axial, do tipo pás inclinadas ou hélices é útil para a suspensão de sólidos, pois atua através do lodo em um único estágio, gerando uniformidade nas variáveis do processo. Enquanto os misturadores com fluxo radial, como os de pás retas e turbinas, por exemplo, são mais adequados para agitação de fluidos viscosos, pois possuem um padrão de mistura em dois estágios: acima e abaixo do impulsor. A Figura 3.7 ilustra alguns tipos de misturadores comumente utilizados em tanques agitados (McCabe, 1985).

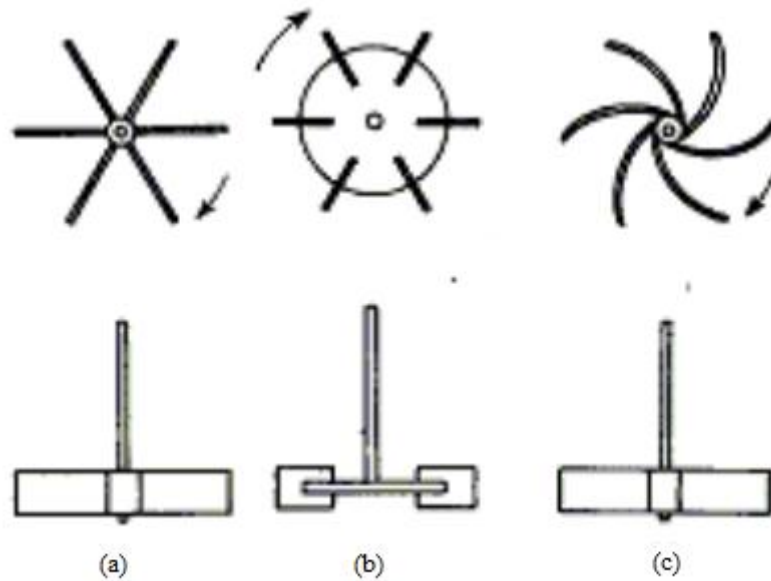


Figura 3.7. Tipos de misturadores mecânicos comumente utilizados em tanques agitados.  
 (a) Turbina de pás abertas; (b) Turbina de disco; (c) Turbina vertical de pás curvas.  
 (McCabe, 1985 - Adaptado)

Em operações contínuas, o aquecimento ou o resfriamento do fluido no tanque é necessário para remover o calor de reação ou para garantir uniformidade de temperatura no tanque. Innocentini (2013) explica que a área de troca térmica em um tanque de mistura pode ser fornecida por camisas, serpentinas ou chicanas (Figura 3.8). Quando o uso desses sistemas falha, bombas e trocadores de calor externos são utilizados para garantir a troca térmica.

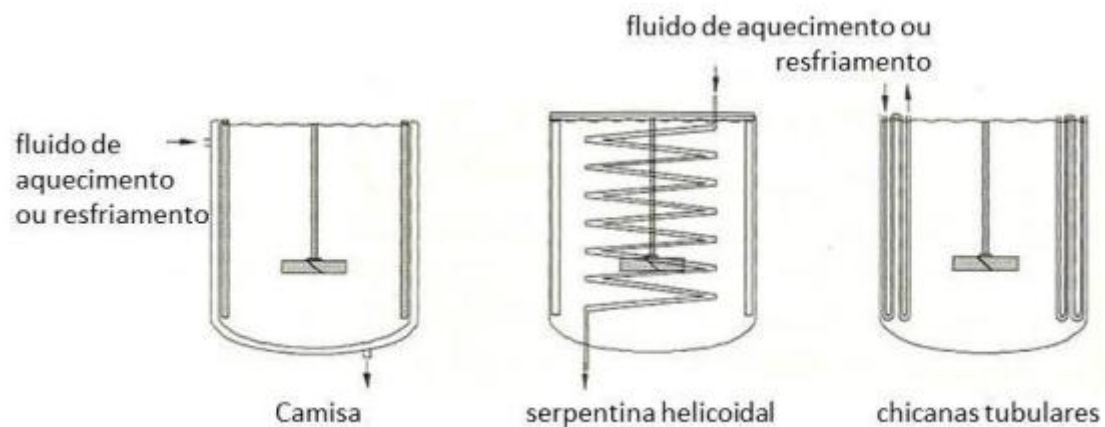


Figura 3.8. Dispositivos de transferência de calor em tanque agitados (Lopes, 2013).

Para a utilização de digestores de alta taxa, o lodo precisa ser adensado previamente, para aumentar a concentração de sólidos e diminuir o volume afluyente ao digestor. O sistema

pode também receber cargas orgânicas adicionais, permitindo assim a co-digestão, que auxilia na melhoria da eficiência e estabilidade do processo de digestão.

### **3.4 CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO GERADO EM ETE E FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

A co-digestão consiste no tratamento simultâneo de diferentes fontes de matéria orgânica em um único digestor. É uma alternativa interessante do ponto de vista de otimizar as condições técnicas do processo, como a melhora na relação C/N, a estabilização do pH, a melhoria na estrutura do substrato, e aproveitamento da capacidade do digestor, entre outras (Iacovidou *et al.*, 2012).

Para que a co-digestão ocorra de forma otimizada, deve-se tomar cuidado com a seleção de substratos, para que a produção de metano seja maximizada e não haja inibição do metabolismo microbiano. Além disso, a quantidade de sólidos voláteis em relação ao volume do digestor, ou carga orgânica volumétrica, deve ser observada, uma vez que o volume do co-substrato adicional pode afetar o tempo de detenção do digestor.

A situação mais comum é a utilização de lodo como substrato principal misturado com uma porção menor de outro substrato. Braun (2002) cita que a adição de 5 a 20% de sólidos totais de um co-substrato resulta em uma melhora da produção de biogás entre 40 e 200%.

Segundo Iacovidou *et al.* (2012), uma alternativa interessante de co-substrato a ser utilizado em conjunto com o lodo de esgoto é a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são compostos por diversos tipos de materiais como restos de alimentos, papel, plástico, papelão, madeira, couro, latas, vidro, lamas, gases, vapores, poeiras, sabões, detergentes entre outros. Os restos de alimentos são constituídos de matéria orgânica biodegradável, e por isso são conhecidos como fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, ou FORSU.

As propriedades físicas, químicas e biológicas dos RSU, bem como a sua composição gravimétrica, variam de acordo com características de cada região, como renda per capita, nível de urbanização e padrão de consumo da população. Barcelos (2009) relata em seu estudo que em países com maior renda per capita, a composição dos RSU é predominantemente de origem inorgânica (papel, plástico, etc). Países que possuem menor renda, por outro lado, apresentam uma maior porcentagem de FORSU. Este autor cita que

no Brasil, a concentração de matéria orgânica nos resíduos fica na faixa de 50 a 80%, enquanto que na Suécia essa taxa é de apenas 15%.

A composição da FORSU, por sua vez, depende do tipo e da quantidade de resíduos que a compõem. Straka *et al.* (2007) cita que a fermentação anaeróbia é produzida por três grupos nutricionais de diferentes composições químicas: carboidratos, proteínas e lipídeos.

Alimentos com grande quantidade de carnes e seus derivados são ricos em proteínas e lipídeos; as frutas, legumes, cereais e derivados são ricos em carboidratos; enquanto leite e seus derivados apresentam uma composição balanceada entre carboidratos, proteínas e lipídeos.

Vale observar que enxofre e nitrogênio estão presentes apenas no grupo nutricional das proteínas, e por isso os gases  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{S}$  só são produzidos na digestão desses compostos. Portanto esse grupo é essencial para uma boa relação C/N que contribui para o processo de digestão. Hawkes (1980) sugere que para a digestão anaeróbia, uma relação C/N ótima está na faixa de 20 a 30.

Iacovidou *et al.* (2012) cita que a co-digestão anaeróbia entre FORSU e lodo de esgoto tem sido bastante aplicada nos Estados Unidos e em países da Europa, como a Alemanha e a Escandinávia, que são pioneiras nessa tecnologia. Há vários fatores benéficos associados à essa tecnologia, como o aumento da produção de biogás e a solução para o problema da disposição final ambientalmente adequada dos resíduos, tanto dos resíduos sólidos como dos lodos de esgoto. Para demonstrar tal tendência, na Tabela 3.3 é apresentado um resumo dos dados de alguns sistemas experimentais investigados e disponíveis na literatura científica.

Tabela 3.3. Dados de alguns sistemas investigados e disponíveis na literatura científica.

Referência	Substrato	CH <sub>4</sub> (L CH <sub>4</sub> /g SV)	Condição de Temperatura	Tipo de Reator
Ağdağ e Sponza, 2007	FORSU (100%) com recirculação de 100% de lixiviado	0,148	Mesofílica	Reator batelada em escala de bancada
	Lodo industrial (50%) + FORSU (50%), com recirculação de 100% de lixiviado	0,05		
	Lodo industrial (66%) + FORSU (33%), com recirculação de 100% de lixiviado	0,04		

Tabela 3.3. Dados de alguns sistemas investigados e disponíveis na literatura científica (continuação).

Referência	Substrato	CH <sub>4</sub> (L CH <sub>4</sub> /g SV)	Condição de Temperatura	Tipo de Reator
Dai <i>et al.</i> , 2013	Lodo de esgoto (100%)	0,237	Mesofílica	Reator de Mistura Completa em Escala Piloto
	Lodo de esgoto (70%) + FORSU (30%)	0,303		
	Lodo de esgoto (47%) + FORSU (53%)	0,35		
	Lodo de esgoto (30%) + FORSU (70%)	0,4		
	FORSU (100%)	0,465		
Del Borghi <i>et al.</i> , 1999	Lodo de esgoto (100%)	0,3	Mesofílica	Reator batelada em escala de bancada
	Lodo de esgoto (50%) + FORSU (50%)	0,6		
	FORSU (100%)	0,62		
	Lodo de esgoto (100%)	0,19	Termofílica	
	Lodo de esgoto (50%) + FORSU (50%)	0,36		
Kim <i>et al.</i> , 2003	Lodo de esgoto (100%)	0,116	Mesofílica	Reator batelada em escala de bancada
	Lodo de esgoto (50%) + FORSU (50%)	0,215		
	Lodo de esgoto (100%)	0,163	Termofílica	
	Lodo de esgoto (50%) + FORSU (50%)	0,28		
Martín-González <i>et al.</i> , 2010	FORSU (100%)	0,298	Mesofílica	Reator batelada em escala de bancada
	Óleos e graxas removidos na ETE (5%) + FORSU (95%)	0,301		
	Óleos e graxas removidos na ETE (15%) + FORSU (85%)	0,318		
	Óleos e graxas removidos na ETE (35%) + FORSU (65%)	0,277		
	Óleos e graxas removidos na ETE (100%)	0,278		
Sosnowski <i>et al.</i> , 2003	Lodo de esgoto (100%)	0,019	Termofílica	Semi-UASB
	Lodo de esgoto (75%) + FORSU (25%)	0,014		Semi-UASB
	FORSU (50%)	0,018		CSTR
	FORSU (50%)		Mesofílica	Semi-UASB
	Lodo de esgoto (100%)	0,024	Termofílica	CSTR
	Lodo de esgoto (100%)		Mesofílica	Semi-UASB
	Lodo de esgoto (75%) + FORSU (25%)	0,023	Termofílica	CSTR
	Lodo de esgoto (75%) + FORSU (25%)		Mesofílica	Semi-UASB
Sosnowski <i>et al.</i> , 2008	FORSU (100%)	0,234	Mesofílica	Reator batelada em escala de bancada
	Lodo de esgoto (100%)	0,318		
	Lodo de esgoto (75%) + FORSU (25%)	0,439		
Gao <i>et al.</i> , 2016	Lodo ativado (25%) + FOSRU de restaurantes (50%) + resíduos de frutas e vegetais (25%)	0,72	Mesofílica	Reator de Mistura Completa em Escala Piloto
	FOSRU de restaurantes (66,7%) + resíduos de frutas e vegetais (33,3%)	0,72		
	Lodo ativado (60%) + FOSRU de restaurantes (26,7%) + resíduos de frutas e vegetais (13,3%)	0,48		



Kim *et al.* (2003) analisaram a produção de biogás em condições mesofílicas e termofílicas na Coreia, e verificaram que uma proporção de mistura de 50% de FORSU e 50% de lodo de esgoto elevou a produção de metano em 85% na condição mesofílica e 71% na termofílica.

Em um estudo de caso realizado na Áustria por Nowak *et al.* (2015) foi observado que a adição da FORSU de restaurantes como co-substrato para a digestão do lodo produzido na estação de tratamento de efluentes domésticos, elevou gradualmente a produção de biogás em cerca de 180%, enquanto que o aumento da produção de sólidos digeridos foi de apenas 5 a 10%.

Del Borghi *et al.* (1999) realizaram um estudo semelhante na Itália, e verificaram que a produção de biogás entre um reator mesofílico contendo apenas a mistura de lodos e outro com uma mistura de 50% de lodos e 50% de FORSU aumentou em 100%. Entretanto, a mesma comparação em condições termofílicas resultou em um aumento de 89% na produção de metano.

Sosnowski *et al.* (2008) compararam separadamente a digestão anaeróbia, em condições mesofílicas, do lodo proveniente de uma estação de tratamento de esgotos na cidade de Lodz, na Polônia; a digestão anaeróbia apenas da FORSU; e a digestão da mistura entre os dois co-substratos em uma proporção de 75% de lodo e 25% de FORSU. Os autores concluíram que o volume de biogás produzido com a digestão do lodo, de 180,59 dm<sup>3</sup>, foi menor do que o produzido a partir da digestão da FORSU, de 228,34 dm<sup>3</sup>; e o volume alcançado com a mistura foi de 232 dm<sup>3</sup>, o que evidencia a melhora sensível na produção de biogás. Os resultados desse estudo mostraram que a co-digestão anaeróbia do lodo de esgoto e a FORSU é atrativa do ponto de vista da proteção ambiental e da produção sustentável de energia.

Pinto (2000) realizou a avaliação da partida da digestão anaeróbia da FORSU inoculada com percolado de digestor anaeróbio e verificou que a concentração de ST que representou o maior desempenho na partida dos reatores foi de 13%.

Ağdağ e Sponza (2007) operaram na Turquia três reatores tratando lodo de esgoto industrial, e FORSU com recirculação de lixiviado. O primeiro reator foi utilizado como reator de controle e operou apenas com FORSU com recirculação do lixiviado. O segundo, operado com uma mistura de FORSU e lodo de esgoto industrial e em uma proporção de 1:1, e o

terceiro de forma semelhante ao segundo, porém com uma proporção de 1:2. Os autores avaliaram a concentração de metais pesados presentes no lodo industrial, que foram: cromo total 0,16, zinco 0,58, cobre 0,02, chumbo 0,01, ferro 0,8 e magnésio 0,2 mg/L. Níquel e cádmio não foram detectados. Foi concluído com esse estudo que a recirculação de lixiviado aumentou significativamente a produção de biogás, servindo como fonte de carbono para o aumento da atividade dos micro-organismos metanogênicos. Porém, nos reatores em que o lodo de esgoto industrial foi adicionado, percebeu-se uma diminuição significativa na produção de metano, que foi de 31% para o reator que tinha apenas FORSU, 20% e 12% para os reatores com a mistura de lodos nas proporções 1:1 e 1:2 respectivamente, indicando que os compostos diluídos com lodo industrial se mostraram tóxicos aos microrganismos.

Dai *et al.* (2013) verificaram que a co-digestão não apenas favorece a melhora da produção de biogás no sistema, mas também melhora a estabilidade da atividade dos micro-organismos que atuam no processo. Além disso, os autores inferiram que a produção de biogás e a redução de sólidos voláteis é linearmente proporcional à fração de FORSU adicionada ao sistema.

Gao *et al.* (2016) compararam a digestão de FORSU proveniente de restaurante universitário, com resíduos de frutas e vegetais provenientes de uma feira, e o lodo ativado de uma estação de tratamento de esgotos em Pequim, na China. Estes autores verificaram que a eficiência do sistema diminuiu com a adição de lodos, pois o que apresentou menor produção de biogás foi o reator alimentado com 60% de lodos. Os reatores operados apenas com a mistura de FORSU e com 25% de lodos apresentaram resultados semelhantes na produção de biogás.

Martín-González *et al.* (2010) realizou um experimento utilizando os óleos e graxas removidos nas fases iniciais de uma estação de tratamento de esgoto na Espanha como co-substrato na digestão da FORSU. Os autores perceberam que a produção de metano aumentou com o aumento gradativo da concentração de óleos e graxas até um limiar de 15%, e depois começou a decrescer a partir de 35% de adição do co-substrato. Concluíram, então, que existe um limite para a mistura na co-digestão, que nesse caso é de 15% de óleos e graxas e 85% de FORSU.

Tchobanoglous (2007) cita, que atualmente, existe um co-digestor de larga-escala em operação nos Estados Unidos, na cidade de Tampa, Florida, em um projeto denominado

REFCOM. Esse reator opera com a mistura entre lodo de esgoto e FORSU com uma taxa de 50 t/d, confirmando que é possível a operação de biodigestores em escala real.

Dos trabalhos avaliados e destacados na Tabela 3.3, é importante ressaltar que a maioria dos sistemas experimentais para a co-digestão foram feitos em escala de bancada ou em escala piloto, sendo a quantidade de reatores existentes em escala real muito baixa. Isso evidencia a necessidade de mais estudos sobre a viabilidade de implantação desses tipos de reatores em escala real, que foi o foco deste trabalho.

### 3.5 ESTUDO DE CASO: RSU DO DISTRITO FEDERAL E LODOS GERADOS NA ETEB NORTE

O Distrito Federal, atualmente, abrange 31 Regiões Administrativas (Figura 3.9) e conta com uma população de 2.914.830 habitantes, estimada para o ano de 2015, segundo o Censo Demográfico do IBGE (2015).



Figura 3.9. Divisão do Distrito Federal segundo as Regiões administrativas (TRE, 2016).

Segundo dados do SLU (2016), em 2015 foram coletadas em média 2.621 t/d de resíduos sólidos no Distrito Federal. Destes, cerca de 184 t/d foram recolhidos por meio da coleta seletiva e destinados a 14 organizações de catadores. Cerca de 667 t/d de resíduos foram recolhidos pela coleta convencional e processadas em duas unidades de tratamento mecânico biológico, para retirada de materiais recicláveis e matéria orgânica, de onde foi possível o aproveitamento de 28 t/d na forma de recicláveis e 122 t/d de composto orgânico. O restante

dos resíduos seguiu para estações de transbordo, e foi direcionado posteriormente para o Aterro Controlado do Jóquei, na forma de rejeito.

A geração per capita de RSU no Distrito Federal foi estimada pelo SLU (2016) para os anos de 2014 e 2015 em 0,86 kg/hab.d, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Quantidade média per capita de RSU para os anos de 2014 e 2015 (SLU, 2016 - Adaptado)

	<b>2014</b>	<b>2015</b>
<b>Coleta convencional (kg)</b>	844.186.280	843.216.833
<b>Coleta seletiva (kg)</b>	47.943.751	57.495.600
<b>Coleta total (kg)</b>	892.130.031	900.712.433
<b>Projeção população (hab)</b>	2.883.559	2.914.830,00
<b>Per capita anual (kg/hab.ano)</b>	309	309
<b>Per capita mensal (kg/hab.mês)</b>	26	26
<b>Per capita diária (kg/hab.d)</b>	0,86	0,86

SLU (2016), explica que a coleta convencional de resíduos sólidos domiciliares e assemelhados consiste na coleta dos resíduos gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e pequenos comércios. Por sua vez, a coleta seletiva consiste no recolhimento de materiais recicláveis (papel, plástico, metal e vidro) que são segregados dos resíduos orgânicos e não recicláveis.

No ano de 2015 foi feito um estudo pelo SLU para caracterizar a composição gravimétrica dos RSU do Distrito Federal. Para isso, foram selecionadas 16 Regiões administrativas e caracterizadas as porcentagens de resíduos recicláveis, orgânicos e rejeitos, nas coletas seletiva e convencional, respectivamente, como ilustrado nas Figuras 3.10 e 3.11. Percebeu-se daí que a quantidade de material orgânico é muito superior na coleta convencional do que na coleta seletiva, o que era esperado. Além disso, percebeu-se que as regiões do Lago Norte e Asa Sul foram as que tiveram maior representatividade no que diz respeito ao percentual de material orgânico na coleta convencional, enquanto Samambaia e Ceilândia foram as regiões com os menores índices observados.

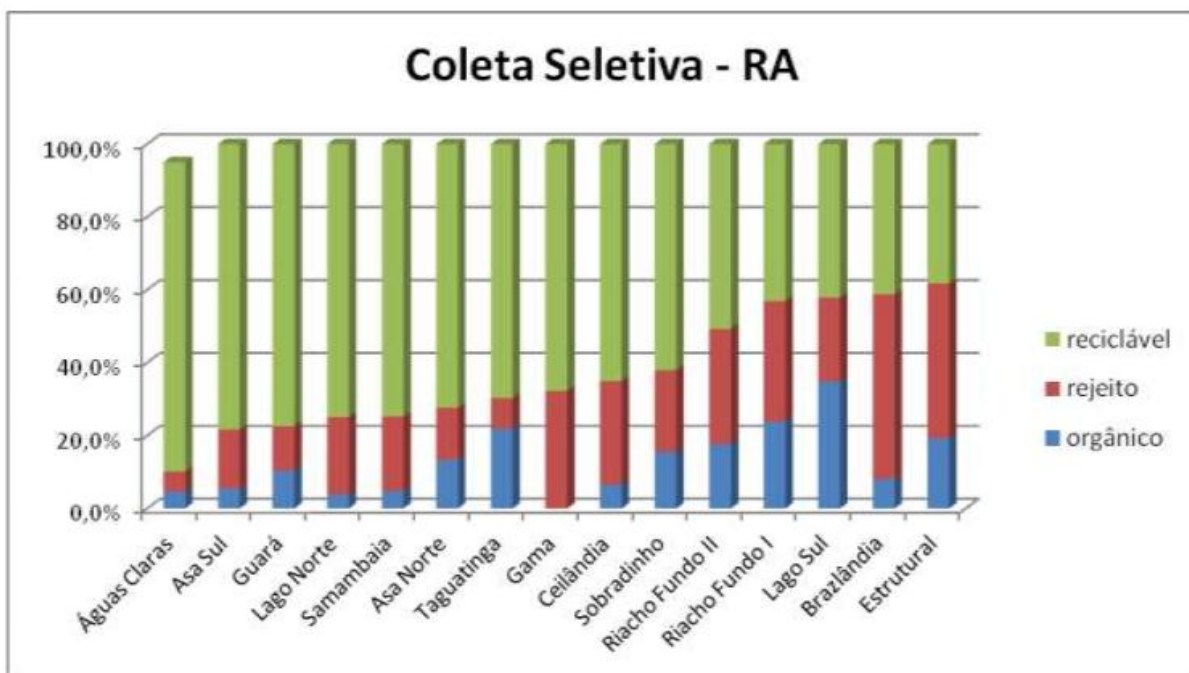


Figura 3.10. Percentuais das frações de resíduos sólidos nas Regiões Administrativas selecionadas considerando a divisão reciclável, rejeito e orgânico - Coleta Seletiva (SLU, 2016).

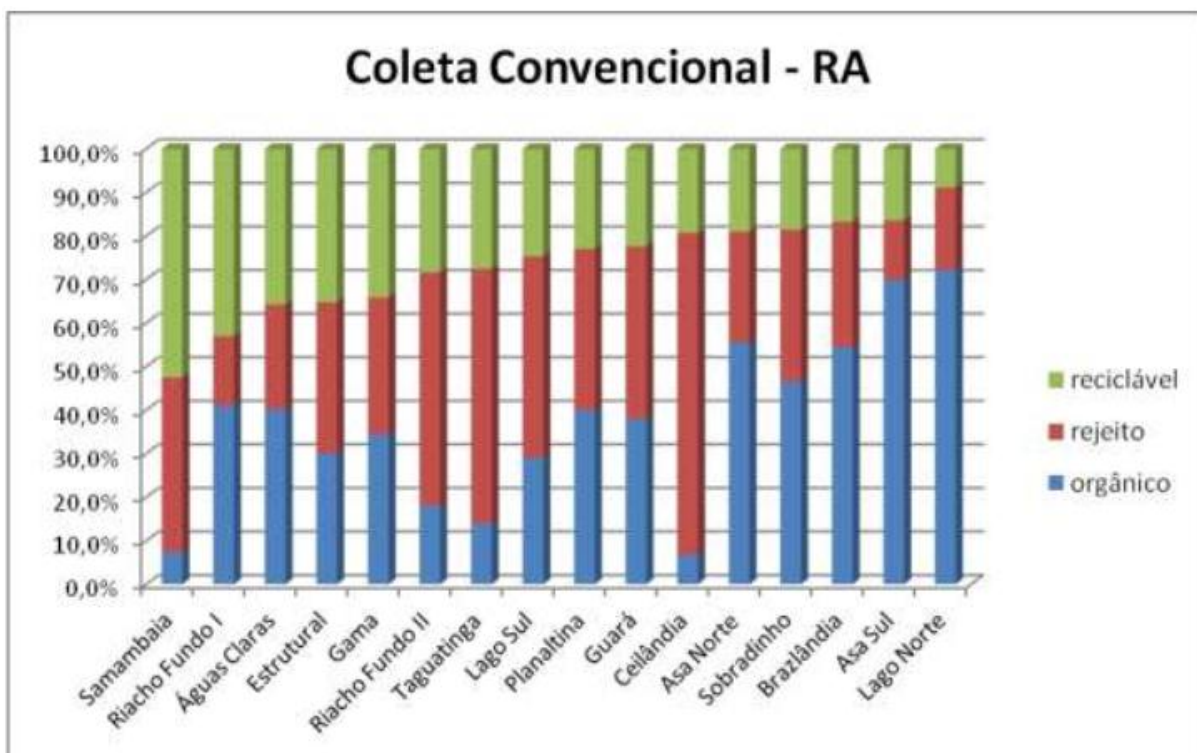


Figura 3.11. Percentuais das frações de resíduos sólidos nas Regiões Administrativas selecionadas considerando a divisão reciclável, rejeito e orgânico – Coleta Convencional (SLU, 2016).

### 3.5.1 Regiões atendidas pela Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte

De acordo com dados da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - CAESB (2013), responsável pelos serviços de água e esgoto do Distrito Federal, 93,71% da população do Distrito Federal é atendida com sistema de coleta de esgoto, e 100% do esgoto coletado é tratado em 17 estações de tratamento, distribuídas ao longo de quatro bacias hidrográficas: Bacia do Lago Paranoá, Bacia do São Bartolomeu, Bacia do Rio Ponte Alta/Alagado e Bacia do Rio Descoberto/Melchior. Dentre as ETEs do DF, destaca-se a Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte (Figura 3.12), localizada na bacia de drenagem do Lago Paranoá, com capacidade para tratar uma vazão média de 920 L/s e atender uma população de cerca de 260.000 habitantes, o que equivale a cerca de 5,6% da população do Distrito Federal, compreendendo as regiões administrativas Asa Norte, Vila Planalto, Vila Varjão, Taquarí, Vila Estrutural e Lago Norte.



Figura 3.12. Vista aérea da Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte (© GoogleEarth, 2016).



Segundo a Codeplan (2014), a Asa Norte, Vila Planalto e Taquari fazem parte da Região Administrativa Brasília/Plano Piloto, que é composta também pela Asa Sul, Estação Rodoviária, Setores de Oficinas, Armazenagem e Abastecimento, Indústrias Gráficas, Embaixadas Norte e Sul, Setor Militar Urbano, Clubes, entre outros.

A Asa Norte, Asa Sul, o Lago Norte e a Estrutural, foram contabilizadas no estudo gravimétrico feito pelo SLU (2016) e apresentaram um percentual de material orgânico significativo na coleta convencional, de 55,6% na Asa Norte, 69,9% na Asa Sul, 72,2% no Lago Norte, e 30% na Estrutural, como ilustrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Representatividade dos materiais na coleta convencional por Região Administrativa do Distrito Federal (SLU, 2016 - Adaptado).

Região Administrativa	Composição gravimétrica na coleta convencional por RA (%)						
	Orgânico	Papel	Metais	Plástico	Vidro	Rejeito	Outros
<b>Asa Sul</b>	69,9	3,9	0,5	7,7	2,7	13,6	1,6
<b>Asa Norte</b>	55,56	5,3	0,4	7,7	3,3	25,4	2,4
<b>SCIA-Estrutural</b>	30,0	10,6	0,9	13,3	0,3	34,7	10,1
<b>Lago Norte</b>	72,2	1,4	0,9	4,2	1,6	18,9	0,8
<b>Média</b>	56,9	5,3	0,67	8,2	1,9	23,2	3,7

O estudo do SLU (2016) considerou a produção de RSU no Varjão igual à da Estrutural, e por isso não foram obtidos dados adicionais sobre essa região. A média obtida para os resíduos orgânicos na composição gravimétrica dos RSU das Regiões Administrativas analisadas foi de 56,9%.

### 3.5.2 Lodos produzidos na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte

A tecnologia de tratamento empregada pela ETEB Norte é o tratamento por lodos ativados a nível terciário/avançado com remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), que compreende cinco etapas, ilustradas nas Figuras 3.13 e 3.14, que são: tratamento preliminar; tratamento primário; tratamento secundário/terciário; tratamento químico e polimento final; e tratamento da fase sólida (incluindo várias etapas de tratamento de lodo).

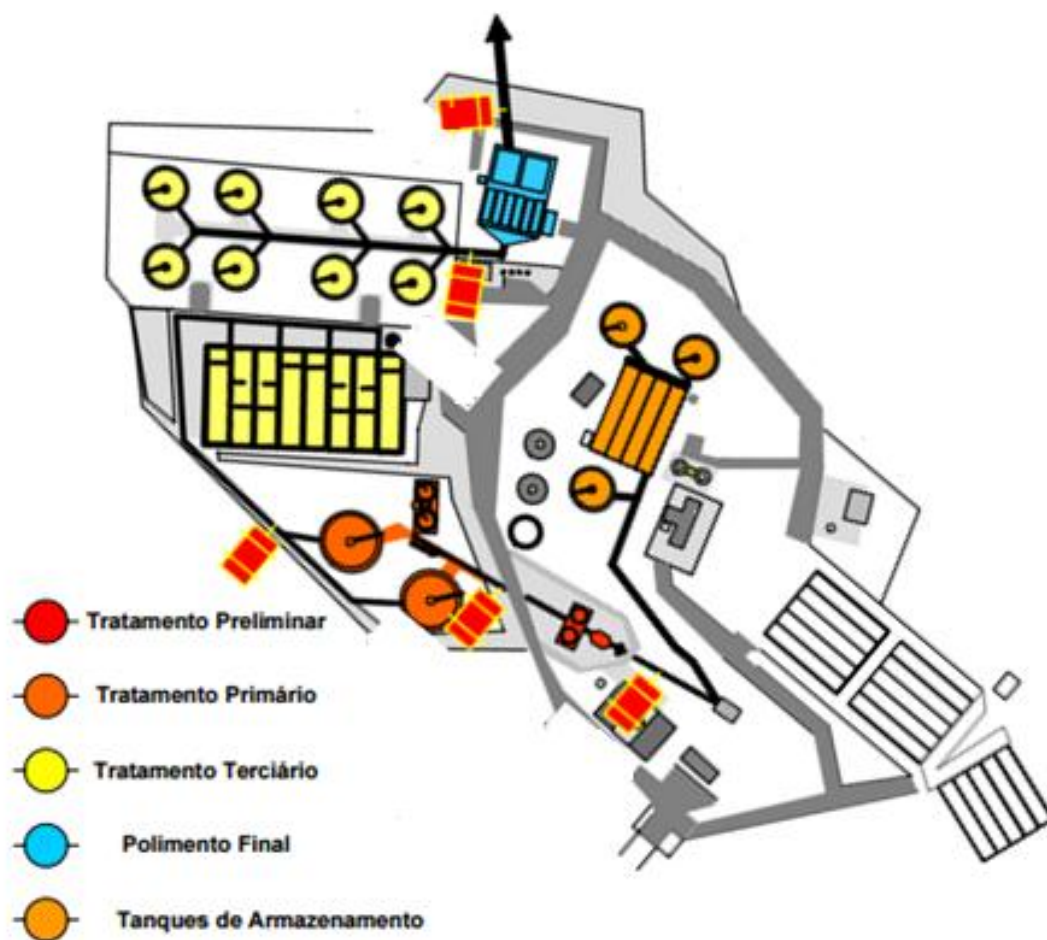


Figura 3.13. Unidades e etapas de tratamento na ETEB Norte (Nakazato, 2005 - Adaptado).

O fluxo de tratamento e as respectivas unidades que recebem os lodos produzidos nas etapas de tratamento do esgoto (Figura 3.14) foram descritos por Nakazato (2005) e adaptados por Batista (2015), que destacou as fases que envolvem o tratamento da fase sólida e seus respectivos caminhos ao longo da estação de tratamento. O tratamento dos lodos compreende as fases de adensamento, digestão anaeróbia, condicionamento e desaguamento. O lodo que é separado nos decantadores primários é bombeado para os adensadores por gravidade. Os lodos descartados nos reatores biológicos são adensados por flotação. Na etapa de polimento final, é feita a remoção de fósforo e sólidos remanescentes, por meio de processos físico-químicos, empregando coagulação/floculação/flotação, com adição de produtos químicos (sulfato de alumínio e polieletrólito aniônico). Os sólidos removidos nos raspadores de superfície no polimento final, são bombeados juntamente com os lodos primário e secundário, para os digestores anaeróbios, dando origem a um lodo misto.



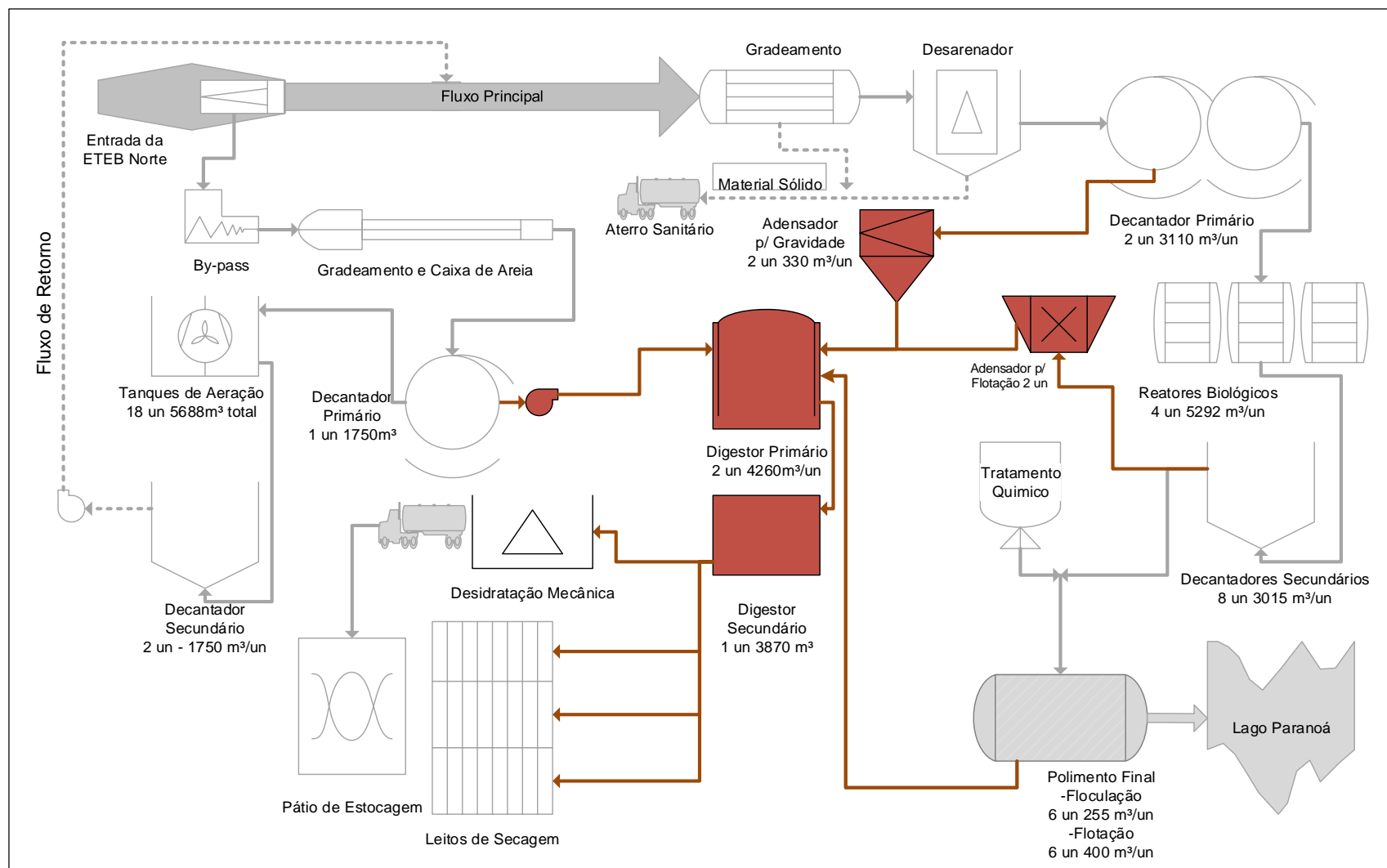


Figura 3.14. Fluxograma da ETE Brasília Norte – Tratamento da fase sólida Adaptado de (Nakazato, (2005) e Batista, 2015).

Segundo Batista (2015), na ETEB Norte existem dois digestores primários de 4.260m<sup>3</sup>, e um digestor secundário de 3.870m<sup>3</sup>. Os digestores primários possuem registros que permitem a alternância da alimentação entre si e o isolamento de um deles, em caso de necessidade. São alimentados continuamente pelos lodos aeróbio e químico, e em forma de batelada pelo lodo primário. Possuem um sistema de recirculação interna com três bombas, rede de sucção, para a tomada de lodo de fundo dos digestores, e rede de recalque, que possibilita o retorno do lodo pela parte superior dos digestores, através de uma tubulação perfurada ao longo de toda a circunferência junto à cúpula.

Os digestores primários foram projetados para operar, originalmente, com fluxo de alimentação e descarte de lodo de forma intervalada. Assim, a cada novo descarte de lodo para o digestor, deveria ocorrer o extravasamento de lodo digerido para o digestor secundário. Porém, a operação teve de ser modificada por problemas com a impermeabilização da cúpula e do anel superior de ambos dos digestores, pois havia riscos de rompimentos. Por isso, atualmente, a passagem de lodo do digestor primário para o secundário é feita a partir da necessidade de volume útil para receber os lodos produzidos na estação, e ocorre de acordo com o volume necessário para o próximo período de produção de lodos, que pode ser de 24h ou menos, dependendo das condições operacionais das fases de produção de lodo anteriores.

O digestor secundário é utilizado, então, apenas para estocar o lodo excedente dos digestores primários, que entra pelo fundo na unidade, juntamente com os lodos digeridos. Esses lodos são concentrados no fundo do digestor, e depois bombeados para o sistema de desaguoamento mecanizado ou para os leitos de secagem. A entrada de lodo digerido é feita pelo fundo da unidade, e por isso, o revolvimento provocado pela entrada do lodo primário prejudica o adensamento do lodo no fundo do digestor. Além disso, a tubulação de remoção do lodo teve que ser seccionada, e atualmente, o lodo é retirado à mesma altura da alimentação. Por essa razão, a rotina de operação foi alterada para que a passagem de lodo ocorra, sempre que possível em horário contrário à operação da desidratação mecânica.

Vale ressaltar que os digestores anaeróbios que existem na ETEB Norte datam da época de construção da estação, em 1969, e por isso encontram-se obsoletos, apresentando alguns problemas de operação, como citado anteriormente.

A partir desse fato, percebe-se a necessidade de uma reforma na ETEB Norte, para a substituição dos digestores antigos e implantação de novos digestores, mais modernos e com maior eficiência na produção de biogás e estabilização dos sólidos.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 ESTRUTURA GERAL DO TRABALHO

O presente trabalho visou avaliar o potencial de produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia dos lodos produzidos na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte (ETEB Norte) e FOSRU gerada nas regiões atendidas por essa ETE.

A metodologia foi realizada segundo as etapas descritas na Figura 4.1.

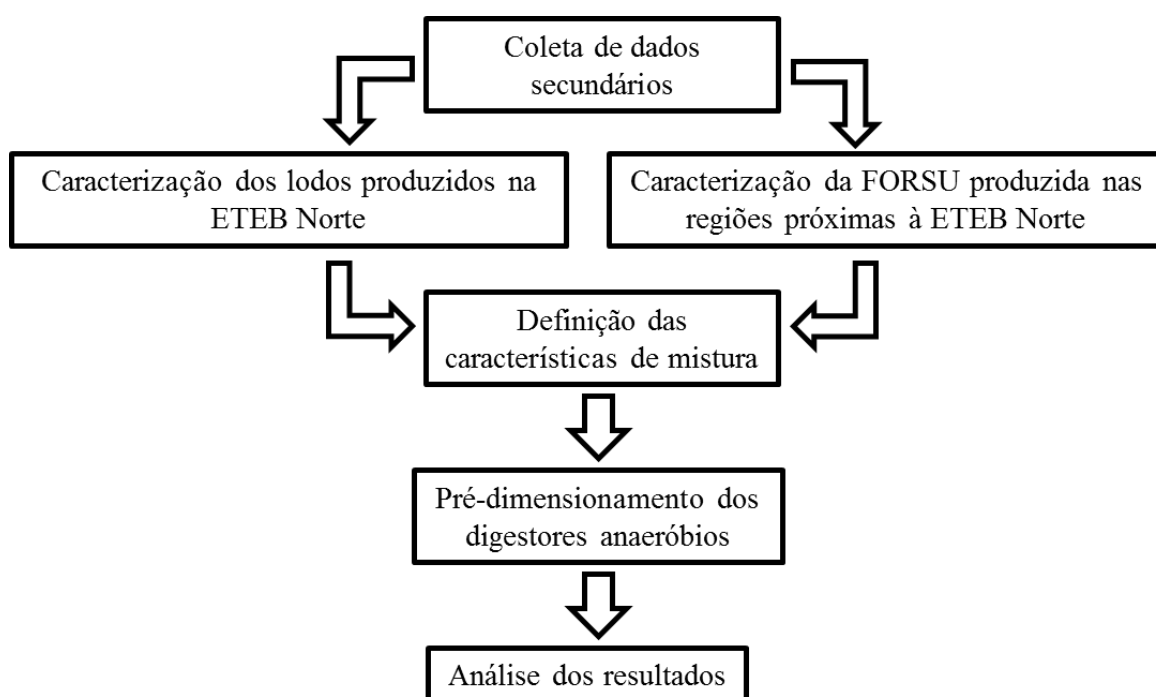


Figura 4.1. Estrutura geral do trabalho

Para nortear os objetivos desse estudo, no que diz respeito aos lodos, foram utilizados dados secundários, disponibilizados por Batista (2015), que caracterizou o desempenho, qualidade e volume de lodos produzidos em cada uma das diferentes etapas de geração e tratamento através de parâmetros agronômicos, inorgânicos e biológicos dos lodos.

Para a avaliação dos resíduos orgânicos, foi realizada a caracterização nutricional da FOSRU produzida em regiões próximas à ETEB Norte através da interpolação de dados quantitativos de coleta seletiva feita pelo Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal – SLU (2016), dados de gravimetria disponibilizados por Gadelha (2005), informações sobre a composição química simplificada dos diferentes tipos de biomassa (Straka et al., 2007), e suas respectivas

frações de proteínas, lipídeos e carboidratos (Belitz *et al.*, 2009; Carucci *et al.*, 2005; Christ *et al.*, 2000; Pedrosa *et al.*, 2015; Straka *et al.*, 2007).

Após a caracterização dos dois substratos, foi possível definir a proporção volumétrica de mistura entre o lodo de esgoto e a FORSU, gerando um meio de reação para o melhor aproveitamento energético teórico da digestão anaeróbia e geração de biogás, descrito por Pinto (2000).

Como produto final deste trabalho, foram definidos os parâmetros operacionais de um conjunto de biodigestores anaeróbios para aplicação em escala real na ETEB Norte, com estimativa da produção de metano e biogás nesses reatores.

## 4.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE DIGESTORES ANAERÓBIOS

Os cálculos utilizados para o pré-dimensionamento dos digestores anaeróbios propostos encontram-se descritos a seguir.

### 4.2.1 Massa e vazão de FORSU adicionada ao digestor

A massa de FORSU utilizada nos digestores foi calculada a partir da população atendida, geração per capita de RSU e percentual médio de FORSU no RSU do Distrito Federal, por um processo de interpolação de dados, utilizando a Equação 4.1

$$M_F = P \times M_{R_{pc}} \times \%orgânico \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:  $M_F$  = massa de FORSU (kg);  
 $P$  = População das RAs analisadas pelo SLU (hab);  
 $M_{R_{pc}}$  = Massa de RSU per capita (kg/hab.d);  
 $\%orgânico$  = porcentagem de resíduos orgânicos das RAs analisadas (%).

De acordo com a massa de FORSU calculada, obteve-se a vazão a partir da densidade, pela Equação 4.2.

$$Q_F = \frac{M_F}{\rho_F} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:  $Q_F$  = Vazão de FORSU adicionada ao digestor (m³/d);  
 $\rho_F$  = densidade da FORSU (kg/m³).

#### 4.2.2 Concentração de Sólidos

As concentrações de sólidos totais e sólidos voláteis foram calculadas a partir da vazão de Lodos e FORSU a serem adicionadas no digestor, de acordo com a Equação 4.3.

$$CS(\%) \text{ do meio de reação} = \frac{((Q_F \times CS_F) + (Q_L \times CS_L))}{Q_F + Q_L} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:  $Q_F$  = Vazão de FORSU adicionada ao digestor (m<sup>3</sup>/d);  
 $CS_F$  = Concentração de sólidos na FORSU (%);  
 $Q_L$  = Vazão de lodos afluyente ao digestor (m<sup>3</sup>/d);  
 $CS_L$  = Concentração de sólidos no lodo (%).

#### 4.2.3 Tempo de retenção e sólidos

A estimativa do volume do digestor foi feita com base no TRS e da vazão afluyente ao digestor, a partir da Equação 4.4.

$$TRS = \frac{V_T}{Q} \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde:  $TRS$  = tempo de retenção de sólidos (d);  
 $V_T$  = volume total do digestor (m<sup>3</sup>);  
 $Q$  = Vazão afluyente ao digestor ( $Q = Q_F + Q_L$ ).

#### 4.2.4 Fatores de carga

A taxa de aplicação de sólidos voláteis, foi calculada pela Equação 4.5.

$$TA_{SV} = \frac{L_{SV}}{V_T} \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde:  $TA_{SV}$  = Taxa de aplicação de sólidos voláteis (kgSV/m<sup>3</sup>.d);  
 $L_{SV}$  = Carga de sólidos voláteis afluyente (kgSV/d);  
 $V_T$  = volume total do digestor (m<sup>3</sup>).

A Taxa volumétrica per capita foi obtida pela Equação 4.6.

$$TV_{PC} = \frac{V_T}{\text{população}} \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde:  $TV_{PC}$  = Taxa volumétrica per capita ( $m^3/hab$ ).

#### 4.2.5 Estimativa de degradação de sólidos voláteis

A degradação de sólidos voláteis foi estimada por meio da Equação 4.7.

$$V_d = 13,7 \ln(TRS_{projeto}) + 18,9 \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde:  $V_d$  = degradação de sólidos voláteis (%);  
 $TRS_{projeto}$  = tempo de digestão de projeto (d).

#### 4.2.6 Estimativa da produção de metano e biogás

Nessa etapa optou-se pela utilização de dados gerais e teóricos de produção de metano em digestores operando em regime de co-digestão, que foram descritos anteriormente na Tabela 3.3.

O volume de biogás foi estimado pela porcentagem de gás metano, pela Equação 4.8.

$$V_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{\% \text{ de } CH_4 \text{ estimada no biogás}} \quad \text{Equação 4.8}$$

Onde:  $V_{biogás}$  = volume de biogás estimado ( $m^3 CH_4/d$ ).

#### 4.2.7 Dimensões dos digestores

##### 4.2.7.1 Volume útil de digestão

As dimensões do digestor foram calculadas pelas Equações 4.9 e 4.10, a partir do volume útil de digestão para unidades cilíndricas.

$$V_{unit} = A_{útil} \times H \quad \text{Equação 4.9}$$

$$A_{útil} = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde:  $V_{unit}$  = Volume unitário de cada digestor ( $V_{unit} = V_T/n$ ), onde  $n$  é o número de digestores utilizados;

$A_{útil}$  = Área superficial do digestor de formato cilíndrico ( $m^2$ );

$H$  = Altura do digestor (m);

$D$  = diâmetro do digestor (m).

#### 4.2.7.2 Dimensões do cone de fundo

O volume e altura do cone de fundo foram calculados, segundo o descrito por Arfelli (2009), pelas Equações 4.11 e 4.12, respectivamente.

$$V_{\text{Cone}} = \frac{0,1309D^3}{\text{tg}\alpha_1} \quad \text{Equação 4.11}$$

$$h_{\text{Cone}} = \frac{D}{2\text{tg}\alpha_1} \quad \text{Equação 4.12}$$

Onde:  $V_{\text{Cone}}$  = volume do cone de fundo ( $\text{m}^3$ );  
 $D$  = diâmetro da base circular (m);  
 $h_{\text{Cone}}$  = altura do cone de fundo (m).

#### 4.2.7.3 Dimensões do tampo semiesférico.

O volume do tampo do digestor foi calculado a partir da Equação 4.13 (Arfelli, 2009).

$$V_{\text{tampo}} = \frac{\pi h_t}{6} \left[ \frac{3}{4} D^2 + h_t^2 \right] \quad \text{Equação 4.13}$$

Onde:  
 $h_t$  = altura do tampo semiesférico (m);  
 $V_{\text{tampo}}$  = volume do tampo semiesférico do digestor ( $\text{m}^3$ ).

#### 4.2.8 Cálculo dos misturadores

As relações geométricas e dimensões dos misturadores adotados seguiram as recomendações feitas por Condori Bustamante (2013), descritas na Figura 4.2 e Tabela 4.1.

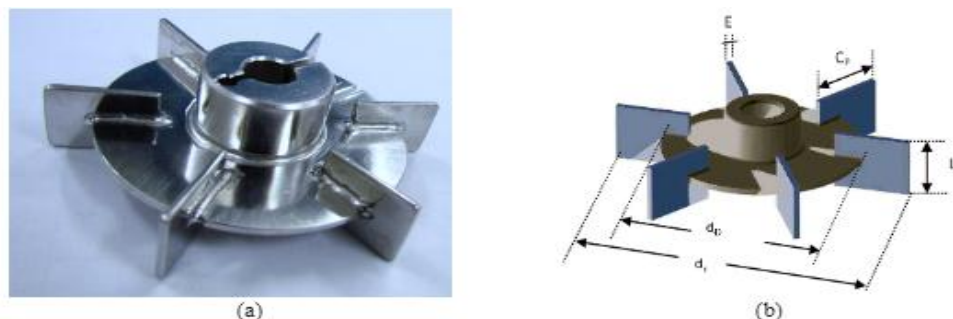


Figura 4.2. Misturador do tipo turbina Rushton (a) fotografia do impelidor e em (b) indicação das dimensões (Condori Bustamante, 2013).



Tabela 4.1. Dimensões dos misturadores do tipo turbina Rushton com 6 pás (Condori Bustamante, 2013).

Descrição	Razão	Valores típicos
Altura do reator/diâmetro do tanque	H/D	2,0-5,0
Diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque	di/D	0,3-0,5
Distância entre impelidores/diâmetro do impelidor	l/di	1,0-1,2
Altura do líquido do reator/diâmetro do tanque	h/D	1,0-2,0
Largura da chicana/diâmetro do tanque	x/D	0,1
Diâmetro do disco/diâmetro do impelidor	dD/di	0,8
Comprimento da pá/diâmetro do impelidor	Cp/di	0,25
Largura da pá/diâmetro do impelidor	LP/di	0,2
Espessura da pá	$\varepsilon$	$1,5 \times 10^{-3}$

A potência útil a ser induzida pelo misturador na massa líquida foi calculada a partir da Equação 4.14

$$Pu = V_{unit} \times P_{unit} \quad \text{Equação 4.14}$$

Onde:  $Pu$  = Potência útil do misturador induzida na massa líquida (kW);

$V_{unit}$  = Volume unitário de cada digestor (m<sup>3</sup>);

$P_{unit}$  = Potência unitária (kW/m<sup>3</sup>).

Uma vez calculada a potência útil, especifica-se o motor do equipamento utilizando um coeficiente de segurança igual a 2, logo a potência do motor foi calculada pela Equação 4.15.

$$P = 2Pu \quad \text{Equação 4.15}$$

Onde:  $P$  = Potência do motor (kW).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS LODOS GERADOS NA ETEB NORTE

A caracterização dos lodos gerados na ETEB Norte foi feita a partir do levantamento de dados produzidos por Batista (2015) em um estudo de caso realizado entre os anos de 2013 e 2014. Nesse estudo, foram levantados alguns parâmetros e indicadores de geração de lodo misto afluente ao desaguamento, produzido diariamente na ETEB Norte, cujos dados podem ser verificados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Parâmetros e Indicadores de geração de lodo na ETEB Norte (afluente ao desaguamento), dados médios para o ano de 2014 (Batista, 2015).

Parâmetros	Valores
População atendida (hab)	163.494
Volume de esgotos afluente (m <sup>3</sup> /d)	41.181
Carga Orgânica afluente (KgDBO/d)	13.042
DBO removida (KgDBO/d)	12.424
Carga Orgânica efluente (kgDBO/d)	618
Eficiência remoção DBO (%)	96
Volume lodo afluente ao desaguamento - digestores (m <sup>3</sup> /d)	467
Volume lodo desaguado (torta) (m <sup>3</sup> /d)	73
Produção de lodo desaguado (ton/d)	63
Densidade do lodo desaguado (ton/m <sup>3</sup> )	0,86

Além disso, foi realizada a quantificação da carga de sólidos provenientes de cada etapa geradora de lodo, e aplicada aos digestores anaeróbios atualmente, como pode ser visto na Tabela 5.2

Tabela 5.2. Carga de sólidos aplicada aos digestores atualmente em operação da ETEB Norte no ano de 2014 (Batista, 2015).

Etapa	Carga de sólidos aplicada (KgSS/d)	Contribuição de cada etapa (%)
Lodo primário adensado	4.346	30,2
Lodo aeróbio adensado	5.922	41,2
Lodo químico	4.123	28,6
Total	14.391	100,0

Ainda sobre as cargas aplicadas, Batista (2015) também caracterizou alguns parâmetros operacionais de controle do processo de digestão anaeróbia da ETEB Norte, disponíveis na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Parâmetros operacionais de controle do processo de digestão anaeróbia da ETEB Norte (Batista, 2015)

Parâmetro	Valores
<b>ST - Teor de sólidos (%)</b>	2,29
<b>SV - Teor de sólidos voláteis (%)</b>	1,57
<b>COV - Carga orgânica volumétrica (KgSV/m<sup>3</sup>.d)</b>	1,79
<b>TDH - Tempo de detenção hidráulica (dias)</b>	17
<b>SV/ST</b>	0,69
<b>Acidez/alcalinidade</b>	0,16
<b>Eficiência na remoção de sólidos voláteis (%)</b>	39

Batista (2015) avaliou ainda a composição físico-química do lodo misto nas condições finais de mistura, segundo parâmetros agronômicos de controle de qualidade para monitoramento do processo de tratamento. Essas características, descritas na Tabela 5.4, possuem relevante importância na quantificação da matéria orgânica, dos nutrientes, dos metais pesados e dos compostos orgânicos potencialmente tóxicos.

Tabela 5.4. Composição dos lodos de esgotos gerados na ETEB Norte quanto aos parâmetros agronômicos, expressos em base seca – Caracterização inicial do lodo CAESB (Batista, 2015).

Parâmetros	ETEB Norte
<b>pH</b>	6,6
<b>Umidade (%)</b>	83
<b>Matéria Orgânica Total (g/kg)</b>	516,38
<b>Carbono Orgânico Total (g/kg)</b>	293,4
<b>Nitrogênio Amoniacal (g/kg)</b>	6
<b>Nitrogênio Total (g/kg)</b>	54,3
<b>Enxofre (g/kg)</b>	24
<b>Cálcio Total (g/kg)</b>	12,4
<b>Magnésio Total (g/kg)</b>	2,6
<b>Potássio Total (g/kg)</b>	1,1

Tabela 5.4. Composição dos lodos de esgotos gerados na ETEB Norte quanto aos parâmetros agronômicos, expressos em base seca – Caracterização inicial do lodo CAESB (Batista, 2015) – Continuação.

Parâmetros	ETEB Norte
Sódio Total (g/kg)	0,6
Alumínio Total (g/kg)	22,6
Ferro Total (g/kg)	12,9
Sólidos Totais (mg/L)	505,7
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	356,3
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	149,4

As características dos lodos levantadas por Batista (2015) foram de fundamental importância para o dimensionamento dos digestores anaeróbios, projetados para operar juntamente com a Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Distrito Federal.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA FORSU GERADA NAS REGIÕES PRÓXIMAS À ETEB NORTE

Diversos autores (Belitz *et al.*, 2009; Carucci *et al.*, 2005; Christ *et al.*, 2000; Pedrosa *et al.*, 2015; Straka *et al.*, 2007) caracterizaram as diferentes frações de proteínas, lipídeos e carboidratos contidas nos alimentos, como indicado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Frações de proteínas, lipídeos e carboidratos de alguns tipos de substratos que compõem a FORSU, em % (Belitz *et al.*, 2009; Carucci *et al.*, 2005; Christ *et al.*, 2000; Pedrosa *et al.*, 2015; Straka *et al.*, 2007).

Alimentos	Substrato (%)			Autor
	Proteínas	Lipídios	Carboidratos	
Arroz	7,4	0,8 – 2,4	76,3	Belitz <i>et al.</i> , 2009
Carne e Ossos	70 – 75	25 - 30	<1	Straka <i>et al.</i> , 2007
Frutas	4	2	83	Christ <i>et al.</i> , 2000
Legumes	23 – 29	1,3 - 5	46 - 74	Belitz <i>et al.</i> , 2009
Feijão	24,9	1,25	51,71	Pedrosa <i>et al.</i> , 2015
Vegetais	26,9	1,36	27,1	Carucci <i>et al.</i> , 2005
Leite integral	26,5	27,4	37,7	Belitz <i>et al.</i> , 2009
Lentilha (grãos)	29	1	70	Straka <i>et al.</i> , 2007
Pão	14	2	84	Straka <i>et al.</i> , 2007

Tabela 5.5. Frações de proteínas, lipídeos e carboidratos de alguns tipos de substratos que compõem a FORSU, em % (Belitz *et al.*, 2009; Carucci *et al.*, 2005; Christ *et al.*, 2000; Pedrosa *et al.*, 2015; Straka *et al.*, 2007) - Continuação.

Alimentos	Substrato (%)			Autor
	Proteínas	Lipídios	Carboidratos	
<b>Peixes</b>	72 – 76	24 - 28	<1	Straka <i>et al.</i> , 2007
<b>Queijos</b>	25 – 35	20 - 45	0	Belitz <i>et al.</i> , 2009
<b>Trigo, centeio</b>	1 – 8	<1	72 - 75	Straka <i>et al.</i> , 2007

Straka *et al.* (2007), além de contribuir com os dados da Tabela 5.5, analisou a composição química simplificada de cada grupo nutricional, com teores típicos de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O) e Enxofre (S), cujos valores encontram-se descritos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Composição química simplificada dos diferentes tipos de biomassa em % (Straka *et al.*, 2007).

Substrato	Elemento Químico (%)				
	C	H	N	O	S
<b>Proteínas</b>	46	5	18,5	30	0,5
<b>Lipídeos</b>	76	12	0	12	0
<b>Carboidratos</b>	40	7	0	53	0

Além disso, Gadelha (2005) determinou a composição elementar da matéria orgânica dos RSU nas RAs Ceilândia e Taguatinga, que apesar de não serem atendidas pela ETEB Note, são representativas para o Distrito Federal. Esses dados podem ser visualizados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Composição elementar da FORSU nas cidades de Ceilândia e Taguatinga – DF (Gadelha, 2005)

Componentes	% em peso dos componentes		
	Ceilândia	Taguatinga	Média
<b>Arroz</b>	14	12	13
<b>Carnes</b>	2	3	2,5
<b>Cascas de frutas</b>	12	14	13
<b>Cascas de legumes</b>	9	9	9
<b>Feijão</b>	4	5	4,5
<b>Folhas de hortaliças</b>	8	6	7
<b>Massas</b>	3	5	4
<b>Ossos</b>	3	4	3,5
<b>Outros</b>	4	3	3,5
<b>Papeis sujos</b>	5	7	6
<b>Pedaços de frutas</b>	21	17	19
<b>Pedaços de legumes</b>	6	4	5
<b>Restos de jardinagem</b>	9	11	10

Adicionalmente, foi feito o levantamento da população de cada Região Administrativa considerada neste trabalho, estimado pela Codeplan (2014) e Codeplan (2016), cujos valores encontram-se disponíveis na Tabela 5.8. Optaram-se pelas regiões de Brasília/Plano Piloto, Vila Varjão, Vila Estrutural e Lago Norte principalmente pela sua proximidade com a ETEB Norte.

Tabela 5.8. População estimada por Região Administrativa (Codeplan, 2014 – Brasília/Plano Piloto; Codeplan, 2016 – demais RAs)

Região Administrativa	População (hab)	Ano
<b>Brasília/Plano Piloto</b>	221.223	2014
<b>SCIA-Estrutural</b>	39.015	2016
<b>Lago Norte</b>	37.455	2016
<b>Varjão</b>	9.215	2016

Destaca-se que não foram encontrados dados para a RA Brasília/Plano Piloto no ano de 2016, pois estes ainda não foram disponibilizados pela Codeplan, por isso utilizaram-se dados referentes ao ano de 2014.

Tendo como base os dados de população atendida, descritos na Tabela 5.8, e considerando uma produção de RSU per capita de 0,86 kg/hab.d, contendo cerca de 56,9% resíduos orgânicos, foi possível realizar a estimativa de produção teórica de FORSU por RA, cujos dados podem ser verificados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Dados de produção teórica diária de FORSU por Região Administrativa do Distrito Federal atendida pela ETE Norte

<b>Região Administrativa</b>	<b>Produção teórica diária de FORSU (kg/d)</b>	<b>Produção teórica diária de FORSU (t/d)</b>
<b>Brasília/Plano Piloto</b>	108281,8	108,3
<b>SCIA-Estrutural</b>	19096,6	19,1
<b>Lago Norte</b>	18333,1	18,3
<b>Varjão</b>	4510,5	4,5
<b>Total</b>	150222,0	150,2

Como resultado, foi estimada uma produção diária de 150,2 t/d de FORSU nas quatro RAs analisadas.

### **5.2.1 Interpolação dos dados de FORSU nas regiões analisadas**

A partir das Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, e considerando a produção diária de FORSU nas regiões analisadas, e descritas na Tabela 5.9, foi realizada a caracterização estimada dos componentes químicos de cada tipo de alimento constituinte da FORSU avaliada. Assim, através da interpolação desses dados, foi possível obter a Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Estimativas das massas de substratos e elementos químicos da FORSU das RAs analisadas, por componente.

Componentes	Massa dos componentes (t)	Massa por Substrato (t)				Massa por Elemento Químico (t)				
		Proteínas	Lipídios	Carboidratos	Outros	C	H	N	O	S
<b>Arroz</b>	19,526	1,44	0,31	14,90	2,87	6,86	1,15	0,27	8,37	0,01
<b>Carnes e ossos</b>	9,012	6,53	2,48	0,09	0,00	4,93	0,63	1,21	2,31	0,03
<b>Cascas e pedaços de frutas</b>	48,064	1,92	0,96	39,89	5,29	17,57	3,00	0,36	21,84	0,01
<b>Cascas e pedaços de legumes</b>	21,028	5,47	0,66	12,62	2,28	8,07	1,24	1,01	8,41	0,03
<b>Feijão</b>	6,759	1,68	0,08	3,50	1,50	2,24	0,34	0,31	2,37	0,01
<b>Folhas de hortaliças</b>	10,514	2,83	0,14	2,85	4,69	2,55	0,36	0,52	2,38	0,01
<b>Massas</b>	6,008	0,84	0,12	5,05	0,00	2,50	0,41	0,16	2,94	0,00
<b>Outros</b>	5,257									
<b>Papeis sujos</b>	9,012				-					
<b>Restos de jardinagem</b>	15,02									
<b>Soma</b>	150,2	20,72	4,76	78,89	16,63	44,71	7,13	3,83	48,60	0,10



Destaca-se que pela falta de dados correspondentes a papéis sujos e restos de jardinagem, e outros componentes, não foi possível estimar a massa de substratos e elementos químicos de cerca de 20% da amostra utilizada. Assim, das amostras com representatividade, foi observado que cerca de 65,2% corresponde a carboidratos, 17,12% são proteínas, 3,94% dos substratos da amostra são compostos por lipídeos, enquanto 13,74% corresponde a outros substratos como ilustrado na Figura 5.1.

Verifica-se ainda que como não é possível conhecer a composição química de 13,74% dos substratos, a representatividade das amostras caiu para 66,26% neste quesito. Assim, das 150,2 t de FORSU produzida nas quatro RAs, aproximadamente 44,71t correspondem à massa de carbono, e 3,83t correspondem à massa de hidrogênio. Com isso em vista, a estimativa levantada foi que a relação C/N da FORSU é aproximadamente 11,66.

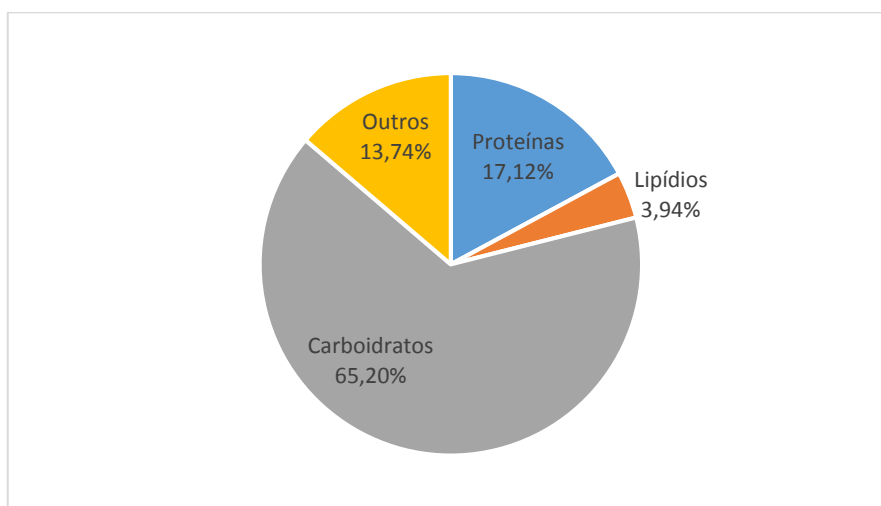


Figura 5.1. Teores de proteínas, lipídios, carboidratos e outros substratos avaliados para a FORSU das RAs analisadas.

Além disso, é perceptível pelas Figuras 5.2 e 5.3, que apresentam ilustrativamente a relação entre a massa de elemento químico e o tipo de resíduo alimentar que a compõe, e a porcentagem de cada elemento químico na FORSU analisada, respectivamente, que a massa de oxigênio nos resíduos é maior que a massa de carbono, fato que pode, de certa forma, ser prejudicial às archeas metanogênicas, que são estritamente anaeróbias no processo de digestão. Além disso, verifica-se que cascas e pedaços de frutas contribuem para maior parte do carbono e do oxigênio presentes na FORSU, por isso uma possível solução seria a diminuição da quantidade desses substratos dentro dos digestores.

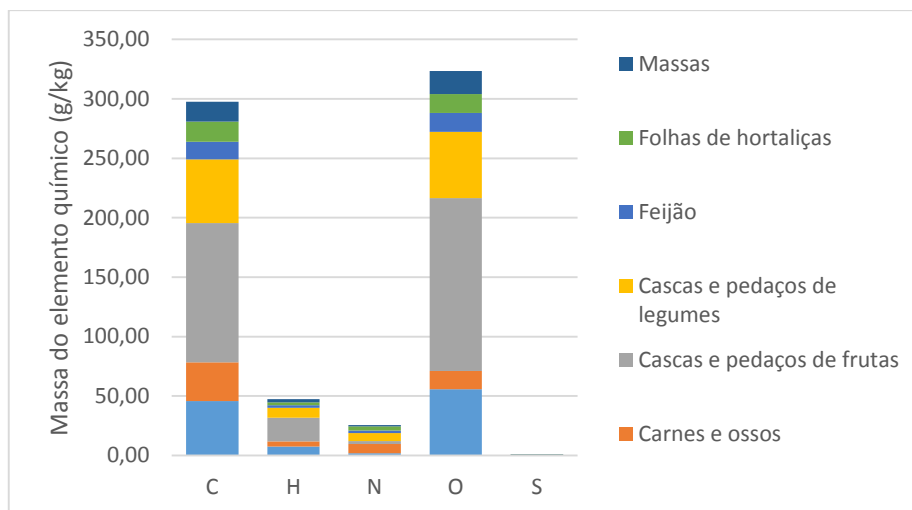


Figura 5.2. Massa de elemento químico por tipo de resíduo alimentar

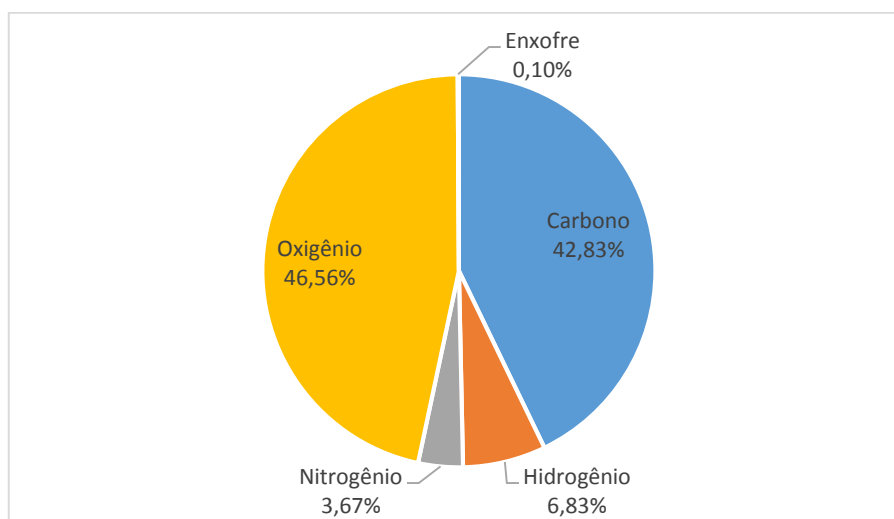


Figura 5.3. Porcentagem de elemento químico na FORSU analisada

Gadelha (2005) também determinou em sua pesquisa alguns parâmetros operacionais que são fundamentais para o processo de digestão anaeróbia, como teor de umidade, densidade, sólidos totais (ST) e sólidos totais voláteis (STV) da FORSU analisada (Tabela 5.11).

Tabela 5.11. Valores médios de ST, STV, Umidade e Densidade da FORSU do Distrito Federal (Gadelha, 2005).

Parâmetros	Valores
Umidade (%)	65
Densidade (g/l)	725
ST (%)	35
STV (%)	12

Com o levantamento dos dados quantitativos e qualitativos estimados foi possível determinar as concentrações de mistura entre os dois co-substratos e definir os parâmetros de projeto dos biodigestores anaeróbios.

### 5.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS DIGESTORES ANAERÓBIOS

O pré-dimensionamento dos digestores anaeróbios foi concebido, principalmente, segundo a metodologia descrita por Metcalf & Eddy (2015). Os autores citam que em termos de tamanho de digestor, os métodos utilizados para o dimensionamento de digestores anaeróbios de alta taxa se baseiam no tempo de retenção de sólidos, na utilização de fatores de carga volumétrica, na degradação de sólidos voláteis, e nos fatores de carga baseados na população atendida.

Quanto ao formato, os autores citam que os digestores mais utilizados são os de formato cilíndrico vertical, fundo cônico, e cobertura semiesférica, como ilustrado na Figura 5.4. Por isso, esse foi o formato escolhido para pré-dimensionamento.

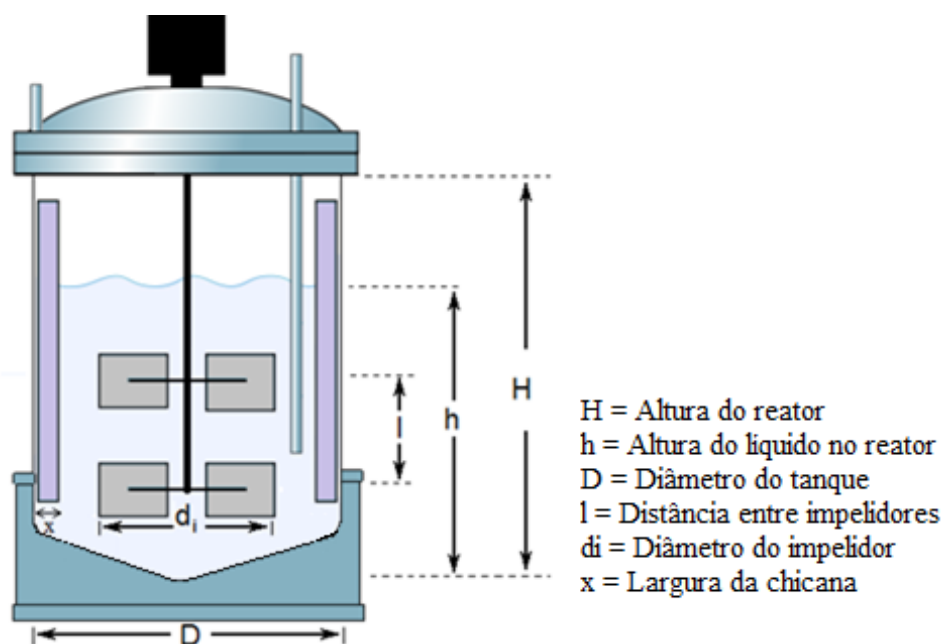


Figura 5.4. Dimensões de um tanque de digestão padrão (Condori Bustamante, 2013 - Adaptado).

Para a co-digestão dos sólidos adicionados no reator, primeiramente foram calculadas a massa e vazão de entrada de FORSU e lodos, depois foram definidas as concentrações de sólidos totais e voláteis da mistura. Após essa etapa, o volume necessário para a co-digestão foi calculado com base no tempo de retenção de sólidos, e as dimensões físicas, por sua vez

foram obtidas com base na geometria de unidades cilíndricas, cones de fundo e coberturas semiesféricas.

### 5.3.1 Massa, vazão e concentração de sólidos na mistura de Lodos e FORSU afluentes ao digestor

A partir das Equações 4.1, 4.2 e 4.3, foi possível construir a Tabela 5.12, que apresenta os dados de entrada de cada co-substrato separadamente e o resultado da mistura entre eles, que por sua vez foi utilizado para o cálculo das dimensões dos digestores anaeróbios. Todos os cálculos encontram-se disponíveis no Apêndice A.

Tabela 5.12. Dados de entrada de lodos, FORSU e parâmetros utilizados para o cálculo das dimensões dos digestores anaeróbios mediante a mistura dos co-substratos.

<b>Parâmetros</b>	<b>Lodo</b>	<b>FORSU</b>	<b>Lodo + FORSU (calculado)</b>
<b>Vazão (m³/d)</b>	467,00	206,90	673,90
<b>Massa (t/d)</b>	401,62	150,00	551,62
<b>Contribuição de cada substrato (%)</b>	69,30	30,70	100
<b>Umidade %</b>	83,00	65,00	77,47
<b>Sólidos Totais (%)</b>	2,29	35,00	12,33
<b>Sólidos Totais Fixos</b>	0,72	23,00	7,56
<b>Sólidos Totais Voláteis (%)</b>	1,57	12,00	4,77
<b>N – total (g/kg)</b>	54,30	25,52	45,46
<b>Densidade (t/m³)</b>	0,86	0,73	0,82
<b>Carbono (g/kg)</b>	293,40	297,65	294,70
<b>Relação C/N</b>	5,40	11,66	6,48

Dos dados apresentados na Tabela 5.12, observou-se que o teor de sólidos totais calculado para a mistura dos co-substratos foi de 12,33%. Em uma pesquisa realizada por Pinto (2000), que avaliou a digestão anaeróbia da FORSU inoculada com percolato de digestor anaeróbio, foi verificado que a concentração de ST de 13% foi a que representou o melhor desempenho na partida dos reatores utilizados. Por essa razão, a concentração calculada foi considerada coerente para o projeto dos digestores propostos.

Observou-se ainda que a relação C/N foi de 6,48, o que foi considerado um valor abaixo do esperado, já que Hawkes (1980) sugere que para a digestão anaeróbia, uma relação C/N ótima está na faixa de 20 a 30, e Bidone & Povinelli (1999) comentam ainda que uma relação C/N baixa significa que há muito nitrogênio no sistema, e este não será consumido e se acumulará na forma de amônia ( $\text{NH}_3$ ), cujos altos teores podem inibir o crescimento das arqueas metanogênicas.

### 5.3.2 Tempo de retenção de sólidos, estimativas de degradação de sólidos voláteis e fatores de carga

Segundo Metcalf & Eddy (2015), os critérios mais relevantes para o dimensionamento de reatores anaeróbios são o tempo de retenção de sólidos (TRS), que é relacionado ao tempo médio de permanência de sólidos no reator; e o tempo de detenção hidráulico ( $\tau$ ), relacionado ao tempo médio de permanência do líquido no reator. Para digestores de alta taxa e mistura completa, o tempo de detenção hidráulico,  $\tau$ , é o mesmo que o TRS.

Para digestores operando na faixa mesofílica, com temperatura de 35°C, a literatura sugere que o TRS e as taxas de aplicação estejam dentro de algumas faixas de valores, de acordo com a Tabela 5.13.

Tabela 5.13. Valores de taxas de aplicação sugeridos pela literatura (Metcalf & Eddy, 2016).

Parâmetro	Símbolo	Valores sugeridos
Tempo de retenção de sólidos (d)	TRS	15 a 20
Taxa de aplicação de sólidos voláteis (kgSSV/m <sup>3</sup> .d)	$TA_{SV}$	1,6 a 4,8
Taxa volumétrica per capita (m <sup>3</sup> /hab)	$TV_{PC}$	0,07 a 0,11

O volume de mistura afluyente aos digestores pode variar de acordo com a operação dos sistemas de tratamento a montante na ETEB Norte e com a produção diária de FORSU. Por essa razão, para o dimensionamento do volume total de digestão, preferiu-se utilizar uma vazão de mistura de 700m<sup>3</sup>/dia, dando uma margem de erro de 3,87% em caso de mudanças na operação na ETE. Adotou-se um tempo de retenção de sólidos de 15 dias, para fins de dimensionamento, e o volume total necessário para digestão foi previsto em 10.500 m<sup>3</sup>.

A taxa de aplicação de sólidos voláteis foi então calculada a partir da Equação 4.5 com base no volume total de digestão e na carga de sólidos totais voláteis de mistura afluyente. Verificou-se que das 551,62 t/d de mistura afluyente, cerca de 33,4 t/d correspondem à carga de sólidos voláteis, e assim, a taxa de aplicação de sólidos voláteis foi estimada em 3,18 kgSSV/m<sup>3</sup>.d, encontrando-se dentro dos valores recomendados na Tabela 5.13.

A taxa volumétrica per capita, por outro lado, foi estimada pela Equação 4.6, com base no volume total de digestão e população de projeto de geração de lodo (Tabela 5.1), em 0,064 m<sup>3</sup>/hab, encontrando-se abaixo dos valores recomendados.

O grau de estabilização foi medido pela porcentagem de redução de sólidos voláteis na mistura de lodos e FORSU alimentada ao digestor, relacionada ao TRS, com base Equação 4.7. Assim, estimou-se uma degradação de sólidos voláteis de 56%, o que significa que das 33,4 t/d de carga de sólidos voláteis afluyente, 18,69 t/d serão degradadas pela digestão anaeróbia.

### **5.3.3 Estimativa da produção de metano e biogás**

Com base na Tabela 5.12, definiu-se que para alcançar a quantidade de sólidos no dia-a-dia operacional dos digestores propostos, deverá ser utilizada uma mistura de co-substratos com aproximadamente 70% de lodos e 30% de FORSU. Relacionando esses dados com os dados de alguns sistemas disponíveis na literatura científica, apresentados na Tabela 3.3, notou-se que Dai *et al.* (2013) realizaram um estudo com condições semelhantes às adotadas neste trabalho. Os autores avaliaram a produção de metano em reatores de mistura completa em escala piloto, operando em faixa mesofílica, e verificaram que para uma co-digestão contendo 70% de lodos e 30% de FORSU, houve uma produção de metano de 0,303 L CH<sub>4</sub>/gSSV.

Considerando o exposto e adaptando para a realidade em estudo, assumindo uma taxa de aplicação de sólidos voláteis de 3,18 kgSSV/m<sup>3</sup>.d, a produção de metano foi estimada em 963,54 L CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup>.d.

Além disso, Tchobanoglous (1993) cita que em digestores anaeróbios operando com regime de co-digestão, de 50 a 60% do biogás produzido é composto de metano. Por isso, com o auxílio da Equação 4.8, foi calculado que serão produzidos entre 1,6 e 1,9 m<sup>3</sup>/d biogás pelo processo de co-digestão anaeróbia nos reatores propostos. Assim, para a TRS de 15 dias, os

digestores devem possuir um volume total de armazenamento de biogás de no mínimo 28,5m<sup>3</sup>.

### 5.3.4 Dimensões dos digestores

Para cumprir o objetivo principal deste trabalho, optou-se por adotar três digestores para substituir os atualmente em operação na ETEB Norte e avaliar a sua viabilidade de implantação através da comparação em termos volumétricos.

Considerando o volume total afluyente aos digestores de 10.500 m<sup>3</sup> de mistura, calculou-se que cada um dos digestores anaeróbios deve ter capacidade para digerir 3.500 m<sup>3</sup> de mistura.

O pré-dimensionamento da parte dos digestores foi realizado a partir do volume útil de digestão para unidades cilíndricas, com as Equações 4.9 e 4.10.

O fundo dos digestores foi projetado de forma a atender o recomendado por Metcalf & Eddy (2015), que indicam que a inclinação do cone de fundo deve ser de no mínimo 10° com relação à horizontal, isso significa que o semiângulo de geratriz com a vertical, indicado na Figura 5.5, como  $\alpha_1$ , deve ser de no máximo 90°. Para fins de dimensionamento foi adotada uma inclinação de 80°, os cálculos de volume e altura dos cones foram elaborados de acordo com as Equações 4.11 e 4.12.

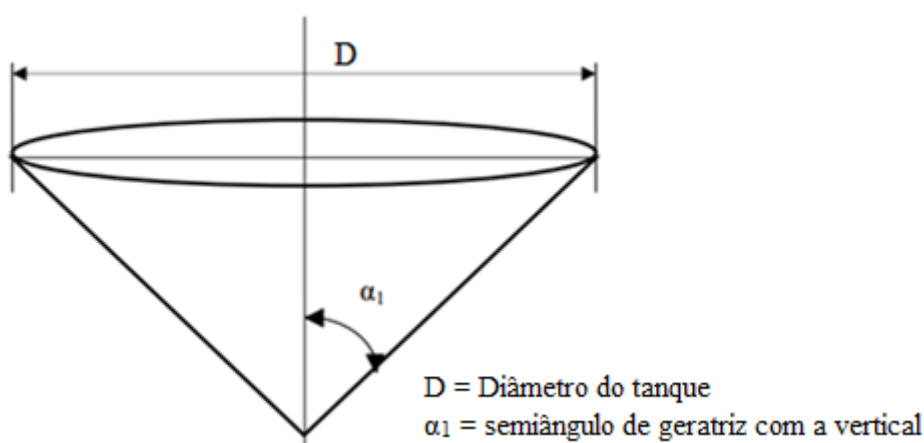


Figura 5.5. Conde fundo adotado com indicação do ângulo  $\alpha_1$  (Arfelli, 2009 - Adaptado).

O tempo do digestor, por sua vez, teve seu volume calculado a partir da Equação 4.13 e seguiu as dimensões indicadas na Figura 5.6, fornecidas por Eurobase (2008).

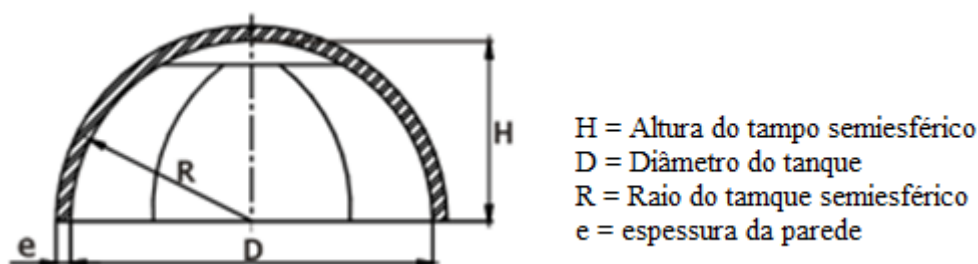


Figura 5.6. Tampo semiesférico (Eurobase, 2008 - Adaptado)

Assim, as dimensões finais dos digestores projetados podem ser verificadas na Tabela 5.14 e na Figura 5.7. Todos os cálculos adotados podem ser verificados no Apêndice A.

Tabela 5.14. Dimensões calculadas para os digestores anaeróbios

Parâmetro geométrico	Símbolo	Dimensão
TRS adotada (d)	TRS	15
Volume total (m³)	V <sub>t</sub>	10.500
Número de digestores	N	3
Volume unitário de digestão para cada digestor (m³)	V <sub>unit</sub>	3.500
Diâmetro	D	17,00
Altura total do reator (m)	HT	20,50
Altura da parte cilíndrica (m)	h <sub>C</sub>	18
Altura de água na parte cilíndrica (m)	h <sub>ac</sub>	15,5
Volume de água na parte cilíndrica (m³)	V <sub>c</sub>	3.386,61
Volume excedente na parte cilíndrica (m³)	V <sub>ex</sub>	699,03
Altura do Cone de Fundo (m)	H <sub>f</sub>	1,50
Volume do cone de fundo (m³)	V <sub>f</sub>	113,19
Altura do tampo semiesférico (m)	H <sub>t</sub>	1,0
Volume do tampo semiesférico (m³)	V <sub>t</sub>	114,01
Altura do fluido (m)	h <sub>d</sub>	17,00
Volume total do digestor (m³)	V <sub>ut</sub>	4.312,84

O volume total de cada digestor foi calculado em 4.312,84 m³. Esse volume encontra-se consideravelmente próximo ao volume dos digestores atualmente em operação na ETEB Norte: dois primários, com volume de 4.260 m³ e um secundário de 3.870 m³ (Batista, 2015). Por isso, pela comparação volumétrica, é possível inferir que a adoção dos três digestores propostos seria viável para substituir os existentes.



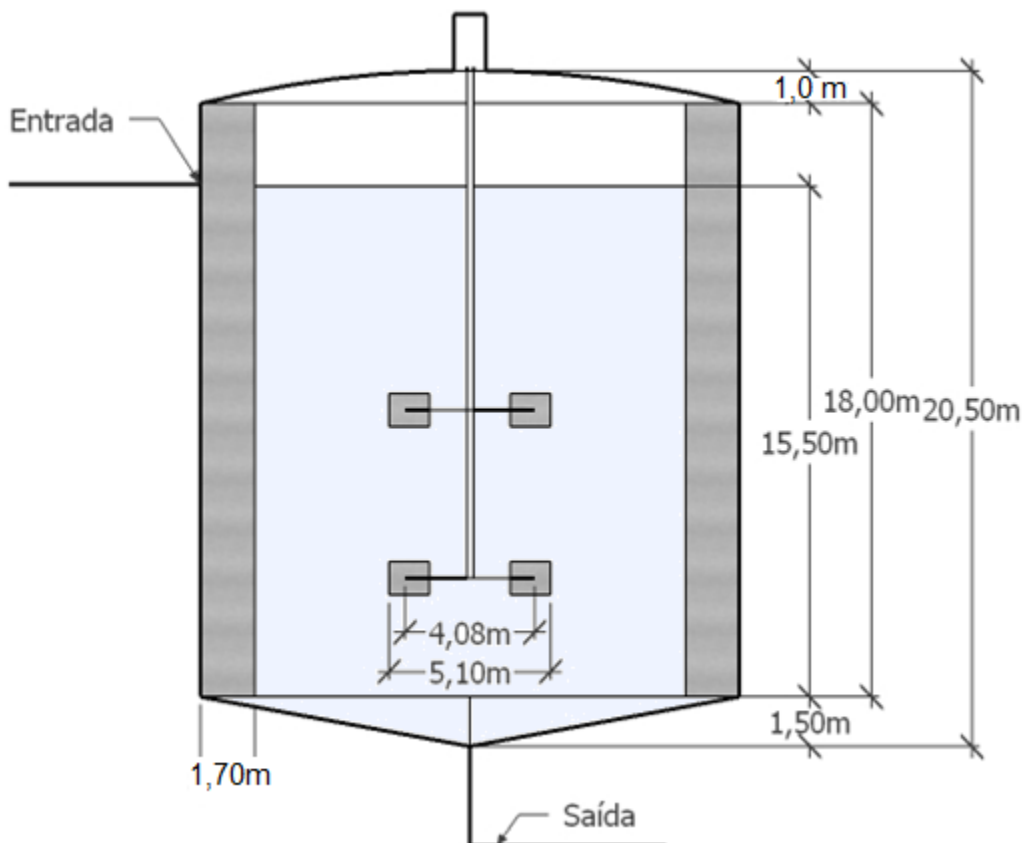


Figura 5.7. Dimensões dos digestores anaeróbios de alta taxa e estágio simples obtidas a partir do pré-dimensionamento.

A recomendação de Metcalf & Eddy (2015) é que o nível de fluido nos digestores esteja compreendido entre 7,5 e 15 m, e o diâmetro, entre 6 e 38 m. O diâmetro que melhor se adaptou às proporções geométricas dos digestores para o volume proposto foi 17 m, encontrando-se dentro dos valores recomendados. A altura total de digestão calculada, por outro lado, foi de 15,5 m, ficando ligeiramente acima do recomendado, porém optou-se por adotar esta altura para que não fosse necessária uma mudança significativa no diâmetro dos tanques.

O volume dos cones de fundo foi estimado em  $113,19 \text{ m}^3$ , e o volume de armazenamento de biogás calculado foi de aproximadamente  $114 \text{ m}^3$ , respeitando o volume mínimo de armazenamento de biogás calculado anteriormente. A altura total dos digestores, considerando todas as partes geométricas, foi de 20,5 m.

### 5.3.5 Cálculo dos misturadores

Optou-se pela utilização de um sistema de mistura mecanizado, com misturadores do tipo turbinas de disco, operando com baixa velocidade, pois observou-se que mesmo que os resíduos sólidos sejam triturados antes da sua entrada no reator, o sistema de aspersão por ar não seria o mais recomendado, podendo apresentar entupimentos recorrentes, além de interferência na operação resultante da presença de trapos e retalhos de outros tipos de materiais, como citado por Metcalf & Eddy (2015).

Optou-se então pela utilização de dois impelidores do tipo turbina Rushton, em cada digestor, com 6 lâminas planas, e com dimensões padronizadas, pois este tipo de misturador possui larga aplicação em operações unitárias industriais com tanques agitados no Brasil.

As dimensões e detalhes construtivos obtidos a partir do pré-dimensionamento das turbinas podem ser verificados na Tabela 5.15 e Figura 5.8.

Tabela 5.15. Dimensões calculadas para os misturadores do tipo turbina Rushton

Descrição	Símbolo	Dimensão
<b>Diâmetro do impelidor (m)</b>	Di	5,10
<b>Distância entre impelidores (m)</b>	L	5,10
<b>Largura da chicana (m)</b>	X	1,70
<b>Diâmetro do disco (m)</b>	dD	4,08
<b>Comprimento da pá (m)</b>	Xp	1,275
<b>Largura da pá (m)</b>	Lp	1,02
<b>Espessura da pá (m)</b>	$\varepsilon$	0,0975
<b>Altura total do agitador (m)</b>	HTA	15,50
<b>Comprimento do agitador no líquido (m)</b>	Da	7,60
<b>Diâmetro do eixo (m)</b>	De	0,20
<b>Espaço entre a base do reator e o agitador (m)</b>	Cl	5,10

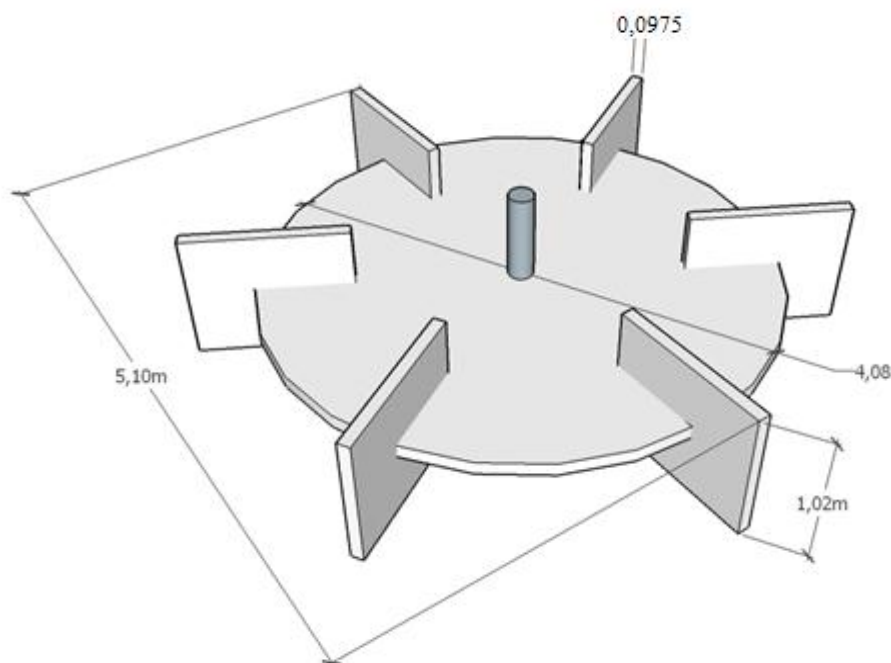


Figura 5.8. Detalhes da turbina Rushton adotada

Considerando a potência unitária recomendada, e com o uso das Equações 4.14 e 4.15, a potência introduzida na água deve estar compreendida entre 35,7 cv e 57,1 cv, e a potência da bomba, por sua vez deve ser de 71,4 cv a 114,2 cv.

Por último, Innocentini (2015) cita que apesar de a transferência de calor em sistemas agitados ser de extrema importância para o projeto de reatores, isso raramente dita o projeto de um tanque de mistura, e o projeto térmico se torna parte complementar. Por isso, optou-se por não abordar o tópico de trocas de calor neste trabalho, ficando como recomendação para trabalhos futuros.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foram atingidos os objetivos propostos no trabalho, tendo em vista que foi possível realizar o levantamento de dados sobre as características dos lodos produzidos na ETE Brasília Norte; quantificar a geração e composição da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos produzidos nas regiões próximas da Estação de Tratamento em estudo; e foram levantadas características de proporção volumétrica da mistura entre os lodos e a FORSU, além da realização do pré-dimensionamento de um conjunto de três digestores com volume de 4312,84 m<sup>3</sup> cada.

Verificou-se que a construção dos digestores propostos tem viabilidade de implantação na ETEB Norte, em termos de volume de digestor, uma vez que esses digestores foram projetados para substituir três unidades de digestão atualmente em operação, sendo dois primários, com volume de 4.260 m<sup>3</sup> e um secundário de 3.870 m<sup>3</sup>, totalizando um volume de digestão de 12.390 m<sup>3</sup>, consideravelmente próximo ao volume total de digestão sugeridos.

Com relação às características da mistura avaliada, a porcentagem de sólidos totais da mistura foi considerada adequada, porém notou-se que a relação C/N encontra-se abaixo do esperado, indicando um possível excesso de nitrogênio no sistema, que poderá ser acumulado na forma de amônia durante o processo de digestão, e ser prejudicial à atividade das arqueas metanogênicas. Além disso, foi observado que a massa de oxigênio na FORSU foi maior do que a massa de carbono, e esse fato pode inibir a atividade das arqueas metanogênicas, uma vez que estas são estritamente anaeróbias.

Destaca-se que este trabalho teve uma proposta pioneira ao sugerir a co-digestão de lodos e FORSU no Distrito Federal, pois nenhum estudo nesse sentido havia sido feito anteriormente.

Para viabilizar a utilização da FORSU produzida no Distrito Federal nos digestores projetados, juntamente com os lodos produzidos na ETEB Norte, recomenda-se que seja feita uma parceria entre a CAESB e o Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal – SLU, responsável pela coleta e disposição final dos RSUs no DF, para que esses resíduos sejam coletados e previamente triturados antes da chegada na ETEB Norte.

Além disso, recomenda-se que sejam feitas campanhas de conscientização ambiental para a “produção seletiva” do lixo, e para que a população tenha plena consciência de que a fração orgânica dos resíduos deve ser separada previamente no local de geração, mesmo sendo coletada por meio da coleta regular. Essa simples ação por parte da população representaria um grande avanço no processo de separação e trituração dos resíduos e uma melhor eficiência de operação dos digestores.

É recomendado também que seja realizado um estudo adicional em escala piloto para que sejam comprovadas as hipóteses estimadas neste projeto, para que os dados de caracterização dos lodos produzidos na ETE Norte sejam revisados e atualizados, e principalmente, para que sejam obtidos outros dados necessários para a caracterização da mistura de lodos e FORSU, como a DQO, por exemplo, que é essencial para previsão da produção real de gás metano nos biodigestores.

Recomenda-se ainda que em trabalhos futuros a serem produzidos, seja considerada no projeto dos digestores a transferência de calor, como parte complementar, visando a manutenção da temperatura desejada nos reatores, e assim, a produção de biogás seja a mais precisa possível.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014. Brasil: Abrelpe, 2014.

AGDAD, O. N., SPONZA, D. T. Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. *Journal of Hazardous Materials*. v. 140. p. 75-85. 2007.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília: Aneel, 2008

ALBERTONI, T. A. Caracterização física dos resíduos sólidos gerados em restaurante universitário. 2013. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

ANDREOLI, C. V. *et al.* Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

APPLES, L., JAN, B., JAN, D., RAF, D. Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34, no. 6. 2008.

Arfelli, Silvio Luiz. Projeto mecânico e análise térmica de tanques cilíndricos verticais com agitação e superfície de troca de calor / Silvio Luiz Arfelli. Bauru. 2009. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro. 2004

BARCELOS, B. R. Avaliação da partida de digestão anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos inoculados com diferentes resíduos agropecuários. Distrito Federal. 2009.

BARCZA, M. V. Apostila Processos Unitários Orgânicos, Escola de Engenharia de Lorena da USP, 1991.

BATISTA, L. F. Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: Um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final. xxvii, 197p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2015).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 2015.

BELITZ, H. D., GROSCH, W., SCHIEBERLE, P. Food Chemistry, fourth revised and extended ed. Springer. 2009.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. EESC/USP, 1999.

BRAUN, R; WELLINGER, A. Potential of Co-digestion, 2002.

CABRAL, C. B. G., *et al.* BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás. Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

CARUCCI, G., CARRASCO, F., TRIFONI, K., MAJONE, M., BECCARI, M. Anaerobic digestion of food industry wastes: effect of codigestion on methane yield. Journal of Environmental Engineering v. 131, p. 1037 e 1045. 2005.

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003.

CASTILHOS JR, A. B. *et al.* Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na Proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

CENSO, I. B. G. E. Disponível em:< <http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>.

CETESB. *Biogás: pesquisas e projetos no Brasil.* 2006.

CHERNICHARO, Carlos A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas Residuárias, v.5)

CHRIST, O., WILDERER, P.A., ANGERHOFER, R., FAULSTICH, M. Mathematical model- ling of the hydrolysis of anaerobic processes. Water Science and Technology 41, 61e65. 2000.

CODEPLAN. “Pesquisa Distrital Por Amostra de Domicílios - PDAD 2015/2016”, Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central, Brasília, Brasil. 2016.

CODEPLAN. “Pesquisa Distrital Por Amostra de Domicílios - PDAD 2013/2014”, Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central, Brasília, Brasil. 2014.

CODEPLAN. Evolução do IDH do Distrito Federal e dos Municípios da Área Metropolitana de Brasília comparativamente às demais unidades da Federação e municípios do Brasil. Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central, Brasília, Brasil. 2013.

COLTURATO, L. F. D. B. BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. O estado da arte da tecnologia de metanização seca / Probiogás; Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

CONAM/DF – Conselho de Meio Ambiente do Distrito Federal. Resolução no 03/2006, de 18/7/2006. Diário Oficial do Distrito Federal no 138, de 20/7/2006, p.10.

Condori Bustamante, Maritza Catalina. Transferência de oxigênio e condições de cisalhamento

Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 375 de 29 de agosto de 2006.

COSTA. F. X.; LUCENA, A. M. A. DE; TRESENA, N. DE L.; GUIMARÃES, F. S; GUIMARÃES, M. M. B; SILVA, M. M. P; GUERRA, H. O. C. Estudo qualitativo e quantitativo dos resíduos sólidos do Campus I da Universidade Estadual da Paraíba. Revista de Biologia e Ciências da Terra. João Pessoa, v. 6, n. 001, 2006.

DAI, X., DUAN, N., DONG, B., DAI, L. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: Stability and performance. Waste Management. v. 33. p. 308-316. 2013.



DEGANUTTI, Roberto et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

DEL BORGHI, A. CONVERTI, E. P., DEL BORGHI, M. Hydrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste. *Bioprocess Engineering* v. 20 p. 553 – 560. 1999.

DEL BORGHI, A. *et al.* Hydrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste. *Bioprocess Engineering*, v. 20, n. 6, p. 553-560, 1999.

DI BERNARDO, Luiz; SABOGAL PAZ, LYDA PATRICIA. Seleção de tecnologias de tratamento de água. **São Carlos–SP: Ed. LDiBe**, v. 1, p. 817-1016, 2008.

em biorreator convencional com impelidores orelha de elefante / Maritza Catalina Condori Bustamante. -- São Carlos : UFSCar, 2014.

EUROBASE TAMPOS EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS, Tampos Industriais, Mauá, SP, 2007

FERNANDES, F. “Estabilização e Higienização de Biossólidos”. In: Betiol, W.; Camargo, O.A (eds.). *Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto*. Jaguariúna: Embrapa, 45-68. 2000.

GADELHA, E. P. Avaliação de inóculos metanogênicos na aceleração do processo de degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM-70/2004, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2005.

GAO, X., LIU, X., WANG, W. Biodegradation of particulate organics and its enhancement during anaerobic co-digestion of municipal bio waste and waste activated sludge. *Renewable Energy*. 2016.

GOMES, F.C.S.P.; AQUINO, S.F.; COLTURATO, L.F.D.B. Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias. Artigo técnico. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.17. n.3. 2012.

HAWKES, D. L. Factors affecting net energy production from mesophilic anaerobic digestion. In: Anaerobic digestion:[proceedings of the first International Symposium on Anaerobic Digestion, held at University College, Cardiff, Wales, September 1979]/edited by DA Stafford, BI Wheatley and DE Hughes. London, Applied Science Publisher. 1980.

IACOVIDOU, E., OHANDJA, D. G., VOULVOULIS, N. Food waste co-digestion with sewage sludge - Realising its potential in the UK. Journal of Environmental Management. V. 112. P. 267-274. 2012.

INNOCENTINI, M. D. M., Operações Unitárias 3 – Parte 2. UNAERP. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA. IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 7ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 1050p. 2014

KIM, H.W., HAN, S.K., SHIN, H.S. The optimization of food waste addition as a co-substrate in anaerobic digestion of sewage sludge. Waste Management Research 21, p. 515 e 526. 2003.

LOPES, M. D. Comparação experimental da troca térmica entre tanque com serpentina helicoidal e com chicana tubular, para impelidor radial e axial. Santos/SP. 2013.

MATÍN-GONZÁLEZ, L., COLTURATO, L. F., FONT, X., VICENT, T. Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: Recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield. Waste Management. v. 30. p. 1854-1859. 2010.

MCCABE, W. L. JC smith and P. Harriott, Unit operations of Chemical Engineering, 325, 406-408. 1985.

MELO, W.J., MARQUES, M.O. “Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas”. In: Betitoli, W. e Camargo, O.A.(eds), *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna, SP. EMPRAPA Meio Ambiente, p.11-24. 2000.

MENEZES, R. L; SANTOS, F. C. A; LEME, P. C. S. Projeto de minimização de resíduos sólidos no restaurante central do campus de São Carlos da Universidade de São Paulo. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002.

Metcalf & Eddy. Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. 5ª Ed. McGraw Hill Brasil, 2016.

NAKAZATO, C. D. Efeitos da equalização de fluxos sobre o desempenho da estação de tratamento de esgotos de Brasília Norte-ETEB Norte. 151 f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília, Brasília. 2005.

NAYONO, S. E. Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production. KIT scientific Publishing, 2010.

NOGUEIRA. L. A. H. Biodigestão: a alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1986.

NOWAK, O.; ENDERLE, P.; VARBANOV, P. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: Lessons learned from Austrian applications. Journal of Cleaner Production. V. 88, p.125-131, 2015.

Parlatore, Antonio Carlos. Misturadores e floculadores mecanizados: padronização e dimensionamento. Revista DAE, **Edição nº: 88. 1974**

PEDROSA, M. *et al.* Effects of industrial canning on the proximate composition, bioactive compounds contents and nutritional profile of two Spanish common dry beans (*Pharsalus vulgaris* L.). Food chemistry, v. 166, p. 68-75, 2015.

Pinto, D.M.C.L. (2000), “*Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolato*”. Tese de Doutorado. 192p. - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

## RELATÓRIO DA ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO DISTRITO FEDERAL - 2015

SANT'ANNA JR, G. L. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 16, n. 2, p. IV-IV, 2011.

SIESG. Sinopse do Sistema de Esgotamento Sanitário do Distrito Federal. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - Brasília/DF, 2013.

SILVEIRA, B. *et al.* BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto /Probiogás. Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

SIQUEIRA, L. C., Produção de Resíduos no Restaurante Universitário: diagnósticos para ações de Educação Ambiental no Programa Agenda 21 da Universidade de Brasília. 2002.

SLU(a). Relatório Dos Serviços De Limpeza Urbana e Manejo Dos Resíduos Sólidos do Distrito Federal - 2015. 1 ed., Brasília: Serviço de Limpeza Urbana. 2016.

SLU(b). Relatório da Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Distrito Federal – 2015. 1 ed., Brasília: Serviço de Limpeza Urbana. 2016.

SOSNOWSKI, P., KLEPACZ-SMOLKA, A., KACZOREK, K., LEDAKOWICZ, S. Kinetic investigations of methane co-fermentation of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. Bio resource Technology 99, p. 5731 e 5737. 2008.

SOTTI, G. Biogás de Digestão Anaeróbia dos Resíduos Orgânicos de Restaurante Universitário com Efluente Sanitário. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

SOUZA, M. L. B.; LAGE FILHO, F. A. Emprego de biodigestores anaeróbios no aproveitamento energético de resíduos de animais e controle da poluição ambiental. Revista Acadêmica Oswaldo Cruz. ano 1, n.3 julho-setembro 2014 ISSN 2357-81873 (versão on-line). Disponível em: <[http://www.revista.oswaldocruz.br/Edicao\\_3/Artigos](http://www.revista.oswaldocruz.br/Edicao_3/Artigos)>. Acesso em: 10 out. 2016

STASTA, P., JAROSLAV, B., LADISLAV, B., PETR, S., JAROSLAV, O. Thermal Processing of Sewage Sludge. Applied Thermal Engineering 26, no. 13. 2006.

STRAKA, F., JENICEK, P., ZABRANSKA, J., DOHANYOS, M., KUNCAROVA, M. Anaerobic fermentation of biomass and wastes with respect to sulfur and nitrogen contents in treated materials. In: Sardinia Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. CISA, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. 2007.

TCHOBANOGLOUS, G. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. Mcgraw Hill. International Editions. 1993.

TCHOBANOGLOUS, G.; Metcalf & Eddy; BURTON, F. e STENSEL H. D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Tata Mcgraw Hill. 4 Ed., p. 1848. 2002.

TRE. Tribunal Regional Eleitoral Do Distrito Federal. Assessoria Administrativa., 07 jan. 2016. Disponível em: <<http://www.tre-df.jus.br/eleitor/zonas-eleitorais/enderecos-e-telefones-mapa-por-zona-eleitoral>>. Acessado em: 15 out. 2016.

VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Lodos Ativados. Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

WILKIE, A. C. *Biogas and anaerobic digestion: fundamentals and application*. USA: University of Florida. 29 p., 2004.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A:**

**CÁLCULOS REALIZADOS PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO  
DOS DIGESTORES ANAERÓBIOS**

### A.1. Cálculo da massa e vazão de FORSU

$$P = 306.908 \text{ hab}$$

$$M_{R_{pc}} = 0,86 \text{ kg/hab.d}$$

$$\% \text{orgânico} = 56,9\%$$

$$\rho_F = 0,725 \text{ t/m}^3$$

$$M_F = P \times M_{R_{pc}} \times \% \text{orgânico}$$

$$M_F = 306.908 \text{ hab} \times 0,86 \text{ kg/hab.d} \times 0,569$$

$$M_F = 150.222 \text{ kg/d}$$

$$M_F = 150,22 \text{ t/d} \rightarrow \text{Considerar } M_F = 150 \text{ t/d.}$$

$$Q_F = \frac{M_F}{\rho_F}$$

$$Q_F = \frac{150 \text{ t/d}}{0,725 \text{ t/m}^3}$$

$$Q_F = 206,9 \text{ m}^3/\text{d}$$

### A.2. Cálculo da concentração de sólidos

$$Q_L = 467 \text{ m}^3/\text{d};$$

$$CST_F = 35\%;$$

$$CST_L = 2,29\%;$$

a) Sólidos Totais

$$CS(\%) \text{ do meio de reação} = \frac{(Q_F \times CST_F) + (Q_L \times CST_L)}{Q_F + Q_L}$$

$$CST = \frac{(206,9 \times 0,35) + (467 \times 0,0229)}{206,9 + 467}$$

$$CST = 12,33\%$$



b) Sólidos Voláteis

$$CSV_F = 12\%;$$

$$CSV_L = 1,57\%;$$

$$CSV = \frac{(206,9 \times 0,12) + (467 \times 0,0157)}{206,9 + 467}$$

$$CSV = 4,77\%$$

### A.3. Cálculo das taxas de aplicação

a) Taxa de aplicação de sólidos voláteis

$$\text{Concentração } \left( \frac{mg}{L} \right) = \text{Concentração } (\%) \times 10000$$

$$CSV_T = (4,77\%) \times 10000 = 47700 \text{ mgSV/L}$$

$$CSV_T = 47,7 \text{ kgSV/m}^3$$

$$L_{SV} = CSV_T \times Q_T$$

$$L_{SV} = 47,7 \text{ kgSV/m}^3 \times 700 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$L_{SV} = 33390 \text{ kgSV/d}$$

$$TA_{SV} = \frac{L_{SV}}{V_T}$$

$$TA_{SV} = \frac{33390 \text{ kgSV/d}}{10500 \text{ m}^3}$$

$$TA_{SV} = 3,18 \text{ kgSV/m}^3 \cdot \text{d}$$

b) Taxa volumétrica per capita

$$TV_{PC} = \frac{V_T}{\text{população}}$$

$$TV_{PC} = \frac{10500 \text{ m}^3}{163494 \text{ hab}}$$

$$TV_{PC} = 0,064 \text{ m}^3/\text{hab}$$

c) Cálculo da degradação de sólidos voláteis

$$V_d = 13,7 \ln(TRS_{projeto}) + 18,9$$

$$V_d = 13,7 \ln(15) + 18,9$$

$$V_d = 56\%$$

### A.5. Cálculo do volume e dimensões dos digestores

a) Vazão total afluyente aos digestores

$$Q_T = Q_F + Q_L$$

$$Q_T = 467 + 206,9 = 673,9 \text{ m}^3/d$$

Será adotada  $Q_T = 700 \text{ m}^3/d$ .

b) Volume dos digestores de acordo com a TRS

$$TRS = \frac{V_T}{Q_T} \Rightarrow V_T = Q_T \times TRS$$

$$V_T = 700 \frac{\text{m}^3}{d} \times 15 d$$

$$V_T = 10500 \text{ m}^3$$

c) Volume de cada digestor, considerando 3 digestores

$$V_{unit} = \frac{V_T}{3}$$

$$V_{unit} = \frac{10500}{3}$$

$$V_{unit} = 3500 \text{ m}^3$$

d) Dimensão dos digestores

A altura do líquido no reator,  $h_d$  é igual à altura da superfície cilíndrica ( $h_{ac}$ ) + altura do fundo cônico adotado ( $h_f$ ), sendo que

Foi considerado  $h_d = 1D$

$$h_d = h_{ac} + h_f$$

$$h_f = \frac{D}{2 \tan \alpha_1}$$

E o  $\alpha_1$  adotado foi de  $80^\circ$ .

Logo, foi possível calcular o diâmetro da seguinte maneira:

$$h_c = D - h_f$$

$$V_{\text{útil}} = \frac{\pi D^2}{4} h_{ac}$$

$$V_{\text{útil}} = \frac{\pi D^2}{4} (D - h_f)$$

$$V_{\text{útil}} = \frac{\pi D^2}{4} \left( D - \frac{D}{2 \tan \alpha_1} \right)$$

$$V_{\text{útil}} = \frac{\pi D^2}{4} \left( D - \frac{D}{2 \tan \alpha_1} \right)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{\frac{V_{\text{útil}}}{\pi}}{\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{8 \tan(\alpha_1)}}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{3500}{\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{8 \tan(80)}}}$$

$D = 16,97 \text{ m} \rightarrow \mathbf{D \text{ adotado} = 17 \text{ m}}$ , e

A altura do líquido no reator,  $\mathbf{h_d = 17 \text{ m}}$

Calculou-se então o  $h_f$ :

$$h_f = \frac{D}{2 \tan \alpha_1}$$

$$h_f = \frac{17}{2 \operatorname{tg}(80)}$$

$$h_f = 1,49 \text{ m} \rightarrow \text{hf adotado} = 1,5 \text{ m}$$

e) Volume do cone de fundo

O volume do cone de fundo foi então calculado como:

$$V_{\text{Cone}} = \frac{0,1309 D^3}{\operatorname{tg} \alpha_1}$$

$$V_{\text{Cone}} = \frac{0,1309 (17)^3}{\operatorname{tg}(80^\circ)}$$

$$V_{\text{Cone}} = 113,39 \text{ m}^3$$

O volume da parte cilíndrica é o  $V_{\text{util}} - V_{\text{cone}}$

$$V_{\text{Cil}} = V_{\text{útil}} - V_{\text{Cone}} = 3500 - 113,39$$

$$V_{\text{Cil}} = 3386,61 \text{ m}^3$$

$$h_c = \frac{4 V_{\text{Cil}}}{\pi D^2}$$

$$h_c = \frac{4 \times 3386,61}{\pi (17)^2}$$

$$h_c = 14,92 \text{ m} \rightarrow \text{hc adotado} = 15 \text{ m}$$

## A.6. Misturadores

a) A potência útil a ser induzida pelo misturador na massa líquida:

$$P_{\text{unit}} = 0,005 \text{ a } 0,008 \text{ kw/m}^3$$

$$Pu = V_{\text{unit}} * P_{\text{unit}}$$

$$Pu = 5250 * 0,005 = 26,25 \text{ kw}$$

$$Pu = 5250 * 0,008 = 42 \text{ kw}$$

Considerando que  $1 \text{ kw} = 1,35962 \text{ cv}$ ,

$$Pu = 26,25 \text{ kw} \times \frac{1,36962 \text{ cv}}{1 \text{ kw}} = 35,69 \text{ cv}$$

$$Pu = 42 \text{ kw} \times \frac{1,36962 \text{ cv}}{1 \text{ kw}} = 57,1 \text{ cv}$$

b) Potência do motor

$$P = 2Pu$$

$$P = 2 \times 26,25 = 52,50 \text{ kw} = 71,38 \text{ cv}$$

$$P = 2 \times 42 = 84 \text{ kw} = 114,208$$

c) **Dimensões dos misturadores**

**Diâmetro do impelidor di:**

$$\frac{di}{D} = 0,3$$

$$di = 0,3 * 17$$

$$di = 5,1 \text{ m}$$

**Distância entre impelidores l:**

$$\frac{l}{di} = 1$$

$$l = 5,1 \text{ m}$$

$$\frac{x}{D} = 0,1$$

**Largura da chicana x:**

$$x = 0,1 \times 17$$

$$x = 1,7 \text{ m}$$

$$\frac{dD}{di} = 0,8$$

**Diâmetro do disco Dd:**

$$Dd = 0,8 \times 5,1$$

$$\frac{C_p}{d_i} = 0,25$$

$$C_p = 0,25 \times 5,1$$

$$\frac{L_p}{d_i} = 0,2$$

$$Dd = 4,08 \text{ m}$$

$$Lp = 0,2 \times 5,1$$

**Comprimento da pá  $C_p$ :**

$$C_p = 1,275 \text{ m}$$

**Largura da pá  $L_p$ :**

$$Lp = 1,02 \text{ m}$$